

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (navazující magisterské studium)

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



Bc. Jakub JAROŠ

**DETEKCE LINIÍ TERÉNNÍ KOSTRY
Z DAT LETECKÉHO LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ**

**DETECTION OF TERRAIN SKELETON LINES BASED ON LASER
SCANNING DATA**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Jakub LYSÁK

Praha 2011

Zadání diplomové práce

pro Bc. Jakuba JAROŠE

obor Kartografie a geoinformatika

Název tématu: Detekce linií terénní kostry z dat leteckého laserového skenování

Zásady pro vypracování

Cílem diplomové práce je analyzovat možnosti a navrhnout vlastní metodiku pro detekci významných linií terénní kostry z rastrových digitálních modelů terénu se zvláštním důrazem na podrobné modely vytvořené z dat leteckého laserového skenování. Pod významnými liniemi terénní kostry se pro účely zadání této práce rozumí především hřbetnice, údolnice a terénní hrany. Práce se soustředí pouze na ty digitální modely terénu, kde jsou body uspořádané v pravidelné mřížce, tj. nepředpokládá se práce přímo se surovým nefiltrovaným bodovým mračenem dat.

Dílčí cíle práce jsou následující:

- prostudování teoretických aspektů problematiky z pohledu geomorfologie (exaktní definice linií v komplikovanějších typech reliéfu) a matematiky (terén jako funkce dvou proměnných, matematické vlastnosti hledaných linií),
- provedení literární rešerše týkající se uvedeného tématu, zahrnující prostudování stávajících algoritmů a softwaru řešícího tuto problematiku a jejich nedostatky,
- návrh a experimentální implementace vlastního algoritmu / algoritmů pro detekci linií terénní kostry včetně vhodných atributů,

otestování navrženého algoritmu na vhodných datových sadách. Testování by mělo být provedeno na různých typech terénu. Protože se jedná o experimentální implementaci, nebude kladen důraz na ideální časovou a paměťovou složitost algoritmů, ale na jejich funkčnost.

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: dle potřeby

Seznam odborné literatury:

DEMEK, Jaromír. 1986. *Obecná geomorfologie I*. Brno: Státní pedagogické nakladatelství, 1986. 101 s.

WANG, D. 2009. *Morphometric characterisation of landform from DEMs*. International Journal of Geographical Information Science, 2009, 24, s. 305-326. ISSN 1365-8816.

RUTZINGER, M. et al. 2007: Development of algorithms for the extraction of linear patterns lineaments from airborne laser scanning data. In: *Proceedings Geomorphology for the Future*, Obergurgl. Obergurgl, Austria, pp. 161-168. Innsbruck University Press.

RUTZINGER, M. et al. 2010: Classification of breaklines derived from airborne LiDAR data for geomorphological activity mapping. In: *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 12 (EGU2010-2246-2).

VOŽENÍLEK, Vít. 2002. *Diplomové práce z geoinformatiky*. Olomouc : Univerzita Palackého v Olomouci, 2002. 61 s. ISBN 80-244-0469-9.

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Jakub LYSÁK

Konzultant diplomové práce: Ing. Markéta POTŮČKOVÁ, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 1. 11. 2010

Termín odevzdání diplomové práce: srpen 2011

Platnost tohoto zadání je po dobu jednoho akademického roku.

.....

.....
Vedoucí diplomové práce

Vedoucí katedry

V Praze dne 1. 11. 2010

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne

.....

Jakub Jaroš

Poděkování

Na tomto místě chci poděkovat vedoucímu mé diplomové práce RNDr. Jakubu Lysákovi za vstřícnou spolupráci, podnětné připomínky a čas věnovaný konzultacím. Velké poděkování patří také mé rodině, která mne podporovala nejen během zpracování této práce, ale po celou dobu mého studia.

Detekce linií terénní kostry z dat leteckého laserového skenování

Abstrakt

Předmětem této práce je navrhnout nový způsob detekce linií terénní kostry z dat leteckého laserového skenování. V teoretické části je předložen stručný úvod do problematiky leteckého laserového skenování, ve kterém jsou představeny hlavní principy této technologie a postupy aplikované při vytváření digitálních modelů terénu z laserových dat. Blíže je popsáno také využití leteckého laserového skenování na území Česka. Následuje přesné vymezení klíčových pojmů souvisejících s touto prací. Z pohledu geomorfologie, topografie a geoinformatiky jsou definovány zejména termíny linie terénní kostry, terénní hrana, údolnice a hřbetnice. Obsahem literární rešerše je přehled doposud publikovaných způsobů detekce terénních hran. Zahrnutý jsou zde algoritmy zaměřené na zpracování dat v podobě původního bodového mračka i algoritmy určené pro zpracování dat v rastrové podobě. Prioritou je vystihnout základní principy, na kterých jsou publikované způsoby detekce postaveny. V praktické části jsou nejprve představena data, s nimiž bylo dále pracováno. Jádrem práce je popis nové metody detekce linií terénní kostry. Metoda zpracovává laserová data převedená do rastrové podoby a je postavena na analýze příčných profilů získaných dekompozicí rastru. Kromě vyhledání linií je cílem stanovit, jak významně se jednotlivé linie podílejí na utváření charakteristického tvaru terénu v dané oblasti. Díky tomu je možné vyhledat pouze linie, které jsou v oblasti dominantní a naopak potlačit ty, které se v terénu projeví jen nevýrazně a jsou např. projevem šumu v datech. O tom, které linie má algoritmus považovat za významné předem rozhoduje uživatel. Algoritmus byl experimentálně implementován v prostředí softwaru Matlab. V závěru jsou shrnuty hlavní přínosy nového přístupu a jsou diskutovány nedostatky, které byly při jeho testování odhaleny. V rámci příloh jsou prezentovány grafické výstupy pořízené během testování algoritmu na reálných datech.

Klíčová slova: letecké laserové skenování, linie terénní kostry, terénní hrana, digitální model terénu, algoritmus

Detection of Terrain Skeleton Lines based on Laser Scanning Data

Abstract

The objective of the thesis is to design a new detection method of terrain skeleton lines from airborne laser scanning data. The theoretical part provides a brief introduction to airborne laser scanning issue. There are presented major principles of the technology and procedures applied to create digital terrain model from laser data. There is also described an application of airborne laser scanning in the area of the Czech Republic in detail and follows an exact specification of key terms of the thesis. From the geomorphology, topography and geoinformatics point of view there are defined especially terms like terrain skeleton lines, breakline, valley and ridge. Literary research consists of the summary of already published method of breakline detection. There are algorithms focused on data processing in form of original point cloud as well as algorithms focused on processing data in the raster form. Primary goal of the theoretical part is to express major principles of already published method of detection. The practical part firstly introduces data that are used further in the thesis. The objective of the thesis is a description of a new method of detection of terrain skeleton lines. The method processes laser data converted into raster form and it is based on the analysis of transverse elevation profile gained by decomposition of raster. Besides of looking up of lines, the goal is to state, how significant individual lines do participate in forming of characteristic terrain's shape in particular area. Because of that it is possible to look up the lines that are dominant in the area and contrarily suppress the lines whose display is insignificant, for example a display of data noise. The decision of which lines should be considered significant by the algorithm is up to the user. The algorithm was experimentally implemented to the Matlab software. In conclusion there are summarized major contributions of the new method and there are discussed imperfections that were detected during tests. In annexes there are presented graphic outputs created during the real data test of the algorithm.

Keywords: airborne laser scanning, terrain skeleton line, terrain breakline, digital terrain model, algorithm

OBSAH

1	Úvod	10
2	Letecké laserové skenování	13
2.1	Princip skenování a charakteristické vlastnosti dat	14
2.2	Měřicí aparatura a technické pozadí sběru dat	15
2.2.1	Laserová měřicí jednotka	15
2.2.2	Skener	17
2.2.3	Navigační a kontrolní jednotka	18
2.3	Primární zpracování dat	19
2.3.1	Transformace bodového mračka do rastrové podoby	20
2.3.2	Filtrace laserových dat	22
2.3.2.1	Morfologické filtry	22
2.3.2.2	Filtry založené na porovnání sklonu	23
2.3.2.3	Filtry s využitím lineární predikce	24
2.4	Letecké laserové skenování v Česku	25
3	Vymezení základních pojmů	28
4	Publikované Způsoby detekce linií terénní kostry	31
4.1	O’Callaghan, Mark (1984)	31
4.2	Wild, Krzystek, Madani (1996)	33
4.3	Gomes Pereira, Wicherson (1999)	34
4.4	Gomes Pereira, Janssen (1999)	36
4.5	Brugelmann (2000)	37
4.6	Kraus, Pfeifer (2001)	38
4.7	Briese (2004, 2009)	40
4.8	Brzank, Lohmann, Heipke (2005)	41
5	Vlastní metoda detekce linií terénní kostry	43
5.1	Data	43
5.1.1	Lokalita Ohrobec	43
5.1.2	Lokalita Ralsko	44
5.1.3	Lokalita Seč	45
5.1.4	Lokalita Kladruhy	46
5.1.5	Převod dat na rastr	47
5.2	Základní princip	48
5.3	Specifické rysy detekce linií terénní kostry na základě analýzy příčných profilů	49

5.3.1	Úhel svahů tvořících hranu, převýšení hrany oproti okolnímu terénu a délka svahů ve směru příčného profilu	49
5.3.2	Plynulé změny tvaru terénu	51
5.3.3	Směr průběhu terénních hran	53
5.4	Navržené algoritmy pro detekci terénních hran	54
5.4.1	Analýza parametrů terénních tvarů.....	55
5.4.2	Aplikace principů kartografické generalizace	56
5.4.2.1	Douglas – Peuckerův algoritmus	57
5.4.3	Eliminace krátkých hran.....	60
5.4.4	Ztenčování hran.....	61
5.5	Implementace a testování algoritmu	61
5.5.1	Zpracování algoritmu v prostředí softwaru Matlab.....	61
5.5.2	Testování algoritmu	63
6	Diskuze.....	64
7	Závěr.....	69
	Seznam zdrojů informací	70
	Seznam příloh	76

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK

ALS	A irborne L aser S canner
CW laser	C ontinuous W ave laser
ČSN	Česká soustava n orem
ČÚZK	Český úřad z eměměřičský k atastrální
DMP	D igitální m odel p ovrchu
DMR	D igitální m odel r eliéfu
DSM	D igital S urface M odel
DTM	D igital T errain M odel
GPS	G lobal P ositioning S ystem
IMU	I ntertial M easuremet U nit
JTSK	J ednotná t rigonometrická s ít k atastrální
LIDAR	L aser D etection A nd R anging
LF	L etecká f otogrammetrie
POS	P osition and O rientation S ystem
TIN	T riangulated I rrregular N etwork
TIFF	T ag I mage F ile F ormat
UTM	U niversal T ransverse M ercator
VÚGTK	V ýzkumný ú stav g eodetický, t opografický a k artografický
WGS-84	W orld G eodetic S ystem 1984
XYZ	formát pro ukládání prostorových dat
ZÚ	Z eměměřičský ú řad

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1	Stopa laserového paprsku při použití různých typů skeneru.....	18
Tab. 1	Výškopisná data pro území Česka (stav před ALS)	26
Tab. 2	Výstupy z Projektu tvorby nového výškopisu území ČR	27
Obr. 2	Analýza odtokových poměrů – ilustrace jednotlivých kroků	33
Obr. 3	Hranové operátory.	34
Obr. 4	Základní geometrická primitiva. Zleva střecha, svah a schod	35
Obr. 6	Princip detekce terénních hran dle Krause a Pfeifera (2001).....	39
Obr. 7	Typické tvary terénu, kde dochází ke vzniku hran a naznačení polohy rovin vzhledem ke grafu hyp. tangenty (vlevo). Grafy hyperbolické tangenty (vpravo)	41
Obr. 8	Lokalita Ohrobec. Blokdiagram terénu (vlevo) a topografické schéma (vpravo)	44
Obr. 9	Lokalita Ralsko. Blokdiagram terénu (vlevo) a topografické schéma (vpravo)	45
Obr. 10	Lokalita Seč. Blokdiagram terénu (vlevo) a topografické schéma (vpravo)	46
Obr. 11	Lokalita Kladruby. Blokdiagram terénu (vlevo) a topografické schéma (vpravo)	47
Obr. 12	Různě významné terénní hrany zachycené v příčném profilu – modelový příklad	50
Obr. 13	Plynule se rozevírající údolí (vlevo) a postupně zanikající terénní terasa (vpravo).	52
Obr. 14	Přechody mezi dvěma různě skloněnými svahy.....	53
Obr. 15	Příčné profily vedené ve směrech 90 °, 67,5 ° a 45 ° na směr údolí.....	54
Obr. 16	Princip Douglas - Peuckerova algoritmu.....	58
Obr. 17	Detekce hran na zaoblených terénních tvarech	59
Obr. 18	Eliminace krátkých hran. Vlevo původní rastr, vpravo upravený	60
Obr. 19	Aplikace morfologických operací. Vlevo původní rastr, vpravo upravený	61

1 ÚVOD

Rychlý vývoj moderních technologií zasáhl v posledních desetiletích všechny oblasti lidského života. Nejvýrazněji se projevila v technicky zaměřených disciplínách, mezi které nepochybně spadá také sběr výškopisných dat. Tradiční způsoby pořizování údajů o nadmořské výšce zemského povrchu, které představují např. nivelace či tachymetrie, doplnila nejprve letecká fotogrammetrie, a na konci dvacátého století také letecké laserové skenování. I přesto, že je technologie leteckého laserového skenování stále velmi mladá, stačila si již mezi ostatními metodami vydobýt silnou pozici a v současnosti její popularita stále roste. Za velký zájem přitom vděčí zejména třem specifickým vlastnostem, kterými jsou relativně vysoká rychlost sběru dat, značná hustota bodů, popisujících průběh terénu a vysoká přesnost pořízených dat. V porovnání s leteckou fotogrammetrií, která je pro laserové skenování největší konkurencí, lze zmínit ještě další výhody. Díky využití aktivního senzoru není sběr dat omezen pouze na světlou část dne a navíc je částečně umožněno získávat data v oblastech porostlých vegetací. Kromě toho jsou pořízená data vhodnější pro automatizované zpracování (Pavelka, 2011), které je méně náročné nejen časově, ale také finančně (Gomes Pereira; Wicherson, 1999). Uvážíme-li všechna tato pozitiva, pak je velice pravděpodobné, že význam leteckého laserového skenování i nadále poroste. Tuto domněnku ostatně dokládá také fakt, že některé státy již dnes při získávání výškopisných dat ze svého území od letecké fotogrammetrie zcela upustily a nahradily ji právě laserovým skenováním (Pavelka, 2011). Problematika sběru a zpracování dat pořízených touto moderní technologií je dnes velmi aktuální. I navzdory intenzivnímu výzkumu a zvýšenému zájmu odborné veřejnosti zde však stále existují otázky, jejichž řešení dnes není zcela ideální, a tudíž vyžadují další výzkumné úsilí. Jedním z takových případů je detekce linií terénní kostry. Přispět k řešení této problematiky bylo ústřední motivací pro vytvoření této práce.

Terénní kostra představuje generalizovaný popis tvaru terénu prostřednictvím významných linií a bodů. Linie terénní kostry nejčastěji odpovídají místům, kde v terénu dochází k výrazným změnám jeho průběhu. Taková místa se obvykle nachází na rozhraních dvou svahů s různými parametry (sklon, expozice,...) a obecně se označují jako terénní hrany. Některé typy linií jsou dále přesně definovány a přísluší jim zvláštní označení. Příkladem jsou hřbetnice či údolnice.

Kromě linií terénní kostry, které ve skutečném terénu popisují místa hran, existují také linie, které vznikají na oblých tvarech a existence hrany pro ně není podmínkou. Typickým příkladem jsou hřbetnice, procházející po oblých hřbetech. V této práci jsou středem pozornosti zejména ty linie, které se v terénu jako hrany skutečně projevují. V následujícím textu bude běžné zaměňování pojmů linie terénní kostry a terénní hrana.

Znalost průběhu linií terénní kostry je velmi důležitá, ba dokonce, v určitých situacích, zcela zásadní. Objevují se názory, že bez údajů o terénních hranách nelze vytvořit morfologicky přesné digitální modely terénu (Wild; Krzystek; Madani, 1996). V kartografii jsou data popisující hrany využívána při automatizované tvorbě výškopisu v mapách. Své uplatnění nalézá detekce hran také v dopravním inženýrství při plánování komunikací. Z přírodních věd je možné uvést geologický a geomorfologický výzkum pobřežních oblastí, kde jsou hrany využívány při analýzách terénních změn. A existuje také řada aplikací v hydrologii a hydrodynamice, kde hrany popisují prvky terénu, jež významně ovlivňují odtokové poměry. V tomto případě jsou data o terénních hranách obzvláště důležitá, neboť bývají využívána při navrhování protipovodňových opatření (Gomes Pereira; Wicherson, 1999) nebo (Brugelmann, 2000).

Odborné publikace dokumentují několik metod, pomocí nichž je možné, průběh terénních hran v laserových datech odhalit. Jsou známy postupy pracující s daty v podobě původního bodového mráčka i postupy zacílené na zpracování dat převedených do podoby rastru. Převážná většina prací se přitom zaměřuje pouze na samotnou detekci hran a již se nezabývá otázkou, jak významně ovlivňují nalezené hrany charakteristický tvar terénu v dané oblasti. Vysoká přesnost a hustota dat však způsobují, že se v datech projevují i hrany na velmi malých terénních tvarech (strouhy u cest, haldy, drobné erozní zářezy, ...). Znalost průběhu takových hran může být pro některé účely důležitá, v jiných aplikacích však nemají údaje o takovýchto hranách vůbec žádný význam. Je proto vhodné, aby bylo možné v procesu detekce terénních hran ovlivnit, které hrany mají být považovány za významné a mají být v terénu vyhledány, a které lze naopak považovat za nedůležité. Navrhnout nový způsob detekce terénních hran, který by tuto rozšířenou funkcionalitu poskytoval, bylo hlavním cílem celé této práce.

Předložený text je možné rozdělit na část teoretickou a praktickou. V první části je nejprve představena technologie leteckého laserového skenování. Pozornost je zaměřena na základní principy, na nichž laserové skenování stojí, jsou popsány specifické vlastnosti pořizovaných dat, a uvedeny základní postupy využívané při vytváření digitálních modelů terénu, které jsou základním zdrojem dat při terénních analýzách. Dále je zde představen Projekt tvorby nového výškopisu území České republiky, v rámci kterého je letecké laserové skenování velmi hojně využíváno. Z tohoto skenování pochází veškerá data používaná v této práci. Aby bylo možné zabývat se tématem detekce linií terénní kostry, bylo nutné nejprve přesně vymezit, jaké tvary terénu jsou pod tímto pojmem prezentovány. Definování základních termínů, spojených s touto prací, je obsahem celé jedné kapitoly. Značný prostor teoretické části je věnován rozboru stávajících řešení, prezentovaných v odborných publikacích. Rešerše prací, zabývajících se

touto tematikou, představuje teoretický základ, z něhož bylo vycházeno při návrhu a vývoji vlastního postupu.

Představení vlastní metody detekce terénních hran je nejdůležitějším úkolem praktické části. V textu jsou nejprve popsána data, s nimiž bylo při návrhu a především při testování metody pracováno. Následuje vysvětlení základního principu, na kterém je metoda založena a jsou uvedena významná specifika, která je při zpracování laserových dat převedených do rastrové podoby nutné zohlednit. V dalších kapitolách jsou shrnuty dílčí kroky, v nichž je detekce realizována. V závěru praktické části je popsána experimentální implementace algoritmu v prostředí softwaru Matlab a prezentovány výsledky detekce prováděné na reálných datech. Poslední částí práce je diskuze, která shrnuje získané poznatky, uvádí výhody a nedostatky představené metody a navrhuje způsob, jakým metodu dále rozšířit.

2 LETECKÉ LASEROVÉ SKENOVÁNÍ

Při přímém získávání výškopisných dat je dnes využíváno několik základních metod, které lze podle pozice měřicí aparatury v době měření dělit na kontaktní a bezkontaktní (Oršulák; Pacina, 2010). Společným rysem kontaktních metod je sběr dat na všech jednotlivých bodech v zájmovém území, měřicí aparatura je tedy postupně přemísťována ve vymezeném prostoru a na každém stanovišti je provedeno měření výšky. Do této skupiny spadají např. dodnes využívané nivelační a tachymetrické postupy.

Druhá kategorie je charakteristická dálkovým způsobem měření, nejčastěji prováděným z letadla přelétávajícího nad vymezeným prostorem. Hlavní předností bezkontaktních metod je možnost pořizovat data z rozlehlých a mnohdy obtížně dostupných oblastí v poměrně krátkém čase. Na druhou stranu je třeba uvést, že v porovnání s kontaktními metodami je výsledná přesnost měření mnohdy o několik řádů nižší. Tento nedostatek se však díky technologickému pokroku v posledních letech daří eliminovat a při měření rozlehlých území se dnes v drtivé většině případů upřednostňují právě bezkontaktní metody. Ve výčtu těchto metod, kde si dominantní postavení vydobyla především letecká fotogrammetrie, přibyla v relativně nedávné době také metoda leteckého laserového skenování. V české literatuře a zejména v publikacích evropských autorů se často uvádí pod zkratkou ALS pocházející z anglického výrazu Airborne Laser Scanning. Kromě tohoto označení lze převážně v mimoevropských odborných kruzích narazit také na termín LIDAR (Lemmens, 2007), jež je akronymem anglického Light Detection And Ranging. Volně lze tento termín přeložit jako technologii určenou k detekci objektů a měření vzdálenosti k těmto objektům za pomoci světelného elektromagnetického záření.

V následujícím textu jsou shrnuty základní informace o této nejnovější komerčně využívané metodě s cílem přiblížit její základní principy, stručně popsat technické pozadí a uvést typické vlastnosti naměřených dat, jejichž zpracování je ústředním tématem této práce. Podrobnost dalšího výkladu byla podřízena zejména rozsahu celé práce a primární snaze předložit text, jež může dopomoci k vytvoření ucelené základní představy o metodě ALS. Mnohem detailněji se problematikou leteckého laserového skenování zabývají např. autoři (Dolanský, 2004), (Morin, 2002), (Wehr; Lohr, 1999) či (Baltsavias, 1999a), z jejichž prací do určité míry vychází i obsah následující kapitoly.

2.1 Princip skenování a charakteristické vlastnosti dat

Vzhledem k tomu, že laserové skenování používá vlastní zdroj záření a naměřená data jsou ukládána v digitální podobě, řadíme jej mezi metody využívající aktivních digitálních senzorů (Morin, 2002). Tento fakt přináší v porovnání s konkurenční leteckou fotogrammetrií (dále LF) založenou na aplikaci pasivních senzorů celou řadu výhod. Konkrétně je to nezávislost na vnějším zdroji záření, kterým je nejčastěji slunce. To umožňuje realizovat měření nejen za nepříznivých atmosférických podmínek (oblačnost), ale navíc i v libovolnou denní dobu (Kraus; Pfeifer, 1998). Souřadnice bodů jsou při ALS počítány přímo, zatímco při LF se určují dodatečně v rámci vyhodnocování stereoskopické dvojice snímků (Baltsavias, 1999a). Schopnost nalézt odpovídající si body na dvojici snímků je např. v zalesněném území, kde terén překrývá vegetace, často velmi náročné. ALS i v takových situacích dosahuje velmi dobrých výsledků, které jsou svojí přesností dokonce srovnatelné s přesností LF v otevřeném terénu (Kraus; Pfeifer, 1998). Některé systémy jsou schopny zpracovávat také několikanásobné odrazy paprsku od povrchu v rámci jednoho měření, čímž lze získat více výškových údajů pro totéž území. K takovým situacím dochází např. při skenování zastavěných či zalesněných oblastí, kde první odraz nese informaci o nejsvrchnějších objektech (koruny stromů, střechy budov), zatímco poslední odraz popisuje objekty položené níže (nižší vegetační patra, stěny budov či „holý terén“)(Oršulák; Pacina, 2010). S nasazením ALS jsou však spojeny i některá negativa. Zatímco výstupem LF jsou letecké snímky, popřípadě multispektrální data, umožňující vytváření obrazových výstupů, na kterých lze poměrně snadno vizuálně interpretovat jednotlivé objekty, ALS produkuje nepravidelná mračna bodů, která takovouto možnost vizualizace explicitně neposkytují. Identifikaci objektů je pak třeba založit na analýze výškových dat s využitím mnohdy složitých filtračních a klasifikačních algoritmů (Baltsavias, 1999a).

Data pořízená metodou ALS popisuje (Axelsson, 1999) jako pseudonáhodné mračno 3D bodů. Mezi jejich specifické vlastnosti lze uvést zejména vysokou hustotu zaměřených bodů, značnou přesnost a přímo určené souřadnice ve všech třech dimenzích. Konkrétní hustota bodů závisí na rozličných parametrech snímání (výšce letu, rychlosti letadla, technické specifikaci měřicí aparatury) a lze ji přizpůsobit konkrétním potřebám. Moderní zařízení dokážou pořizovat data s hustotou vyšší než 1 bod / m² (Lemmens, 2007). Je však třeba si uvědomit, že s rostoucí hustotou dat roste také jejich objem a časová náročnost jejich zpracování. Přesnost dat je přitom ovlivňována ještě více proměnnými, než tomu bylo u hustoty. Jednotlivé parametry ovlivňující výpočet souřadnic zaměřených bodů jsou shrnuty dále v textu, zde pouze uvedme, že se rozlišuje přesnost zaměření v horizontálním směru a vertikálním směru. Zatímco přesnost ve směru roviny zemského povrchu se pohybuje řádově v centimetrech až decimetrech (Badea; Jacobsen, 2008), v případě vertikální přesnosti dosáhl např. (Pfeifer; Kraus, 1998) při svém výzkumu hodnoty 10 cm, přičemž platí, že kvalita měřících přístrojů se neustále zvyšuje.

Při laserovém skenování je využíváno měřicí aparatury, složené ze čtyř základních prvků: laserové měřicí jednotky obsahující vysílač a přijímač světelného záření, skenovací jednotky zajišťující směřování vysílaného paprsku, navigační jednotky, pomocí níž je určována pozice měřicí aparatury v momentě měření a kontrolní jednotky (Wehr; Lohr, 1999). Kromě toho jsou

využívána další zařízení jako např. paměťová zařízení pro ukládání naměřených dat. Bližší popis jednotlivých komponent je obsažen v kapitole 2.2.

Samotný proces laserového skenování lze zjednodušeně popsat v několika fázích. Nejprve je za pomoci laseru vygenerováno světelné elektromagnetické záření (laserový paprsek) se stanovenými vlastnostmi (vlnovou délkou a divergencí), které je následně vysláno ke snímanému povrchu. Při kontaktu s povrchem se část paprsku odráží zpět k měřicí stanici, kde je zachycena detektorem. V závislosti na typu použitého laseru lze buď z doby mezi vysláním a přijetím paprsku, nebo ze znalosti fázového posuvu a počtu celých period vyslaného signálu vypočítat vzdálenost měřicí aparatury a místa odrazu. Kromě vzdálenosti jsou pro určení polohy snímaného území dále nezbytné údaje o přesné poloze stanice v době měření, jež poskytuje navigační jednotka a znalost úhlu, pod kterým byl paprsek k povrchu vyslán, který eviduje skenovací jednotka.

Jak uvádí Morin (2002), hledané souřadnice měřeného bodu v systému WGS-84 jsou výsledkem výpočtu, kombinujícího všechny výše uvedené parametry, tedy údaje o vzdálenosti, poloze stanice i úhlu snímání. Další autoři navíc doplňují, že pro dosažení velmi přesných výsledků je nezbytné dále zohlednit kalibrační data eliminující chyby vznikající na jednotlivých zařízeních (Wehr; Lohr, 1999) a korekce chyb, jež jsou důsledkem např. atmosférické refrakce (Dolanský, 2004). Pro přepočet souřadnic do místního souřadnicového systému by neměly být opomenuty ani údaje o odchylkách mezi geoidem a referenčním elipsoidem v místě měření (Kraus; Pfeifer, 1998).

2.2 Měřicí aparatura a technické pozadí sběru dat

2.2.1 Laserová měřicí jednotka

Laserová měřicí jednotka se skládá ze dvou hlavních komponent, laseru a detektoru. Laser lze obecně definovat jako zařízení, které je při odpovídajícím fyzikálním působení na jeho aktivní prostředí schopno vyprodukovat úzký svazek velmi intenzivního elektromagnetického záření (Hecht, [200-?]). To bývá označováno také jako svazek laserových paprsků a je prostředkem k získávání informací o snímaném povrchu. Úkolem detektoru je zaznamenat přichodí záření odražené od povrchu. Detektory musí být vysoce citlivé, neboť odražené záření má ve srovnání se zářením emitovaným mnohonásobně nižší energii. Dolanský (2004) např. uvádí, že energie paprsku klesá s druhou mocninou uražené vzdálenosti, což za předpokladu běžné letové výšky 1000 m povede k extrémně nízkým hodnotám. Aby byla detekce co možná nejúčinnější, orientují se optické osy laserů i detektorů vždy stejným směrem (Wehr; Lohr, 1999).

Při leteckém skenování se nejčastěji využívá pevnolátkových laserů s rubínovým aktivním prostředím nebo tzv. Nd:YAG laserů (Dolanský, 2004). Emitované záření má vlnovou délku obvykle v rozmezí 500 – 1500 nm (Baltsavias, 1999a), nejčastější hodnoty jsou však 1060 a 1500 nm, jedná se tedy o záření z infračervené části spektra (Pfeifer; Briese, 2007; Lemmens, 2007). Je na místě uvést, že podobně jako při mulstispektrálním snímání, i laserová data nesou

informace o odrazivosti jednotlivých objektů na povrchu, i když pouze pro uvedenou vlnovou délku. Protože se jedná o infračervené záření, je navíc zřejmé, že standardní systémy ALS nelze využít např. pro batymetrické účely, neboť voda toto záření zcela pohlcuje (Morin, 2002). Pro tyto účely však již byly vyvinuty speciální laserové systémy pracující na takových vlnových délkách, které batymetrický výzkum podporují.

Kromě vlnové délky je zásadním parametrem laseru také hodnota divergence (rozbíhavosti) paprsku, jež definuje velikost okamžitého zorného pole. Wehr a Lohr (1999) považují za běžné hodnoty od 0,3 do 2 mrad. Na základě divergence a výšky letu je pak možné stanovit stopu laserového paprsku odpovídající velikosti území, z něhož budou sebrána data během jednoho měření.

Aby bylo možné laserové záření využít pro určení vzdálenosti mezi aparaturou a povrchem, je nezbytné jej nejprve modulovat nějakým dodatečným signálem do pulzní nebo sinusoidální podoby (Hug; Wehr, 1997). Při pulzní modulaci jsou k povrchu vysílány pulsy trvající od 4 – 15 ns (Lemmens, 2007). Vzhledem ke skutečnosti, že se záření pohybuje rychlostí světla, lze výslednou vzdálenost vypočítat jako součin této rychlosti a doby letu paprsku vydělené dvěma. Z výpočtu je zřejmé jak zásadní roli hraje precizní změření času mezi vysláním a zpětným přijetím pulzu. Z tohoto důvodu jsou využívány velmi přesné hodiny dosahující přesnosti mezi 0,05 a 0,2 ns (Baltsavias, 1999b). Nejmodernější přístroje dnes umožňují vysílat pulsy s frekvencí 100 – 200 kHz (pulse repetition rate, PRR), vždy je však možné vyslat další pulz až po návratu pulzu předchozího. Umožnit paralelní vysílání pulzů je jedním z témat výzkumu v této oblasti (Pfeifer; Briese, 2007). Již v souvislosti s pořizováním dat v územích porostlých vegetací byly zmíněny systémy, jejichž detektory jsou schopny zaznamenat více než jeden zpětný odraz. Nejčastěji se v takových případech evidují dva (první a poslední), maximálně tři odrazy. Existují ale i detektory schopné zachytit až pět různých odražení jednoho vyslaného pulsu (Wagner ... [et al.], 2004). Dále se lze setkat s tzv. full-waveform systémy, které ve velmi krátkých intervalech (1 ns) registrují intenzitu odraženého záření. Z těchto diskrétních hodnot je následně možné zrekonstruovat celý průběh navracujícího se paprsku. V takto pořízených datech lze vyčíst nejen informace o geometrických vlastnostech odrazného povrchu (sklon, orientace, tvary objektů na povrchu,...), ale částečně také informace o jeho materiálovém složení (Pavelka, 2011). Daní za komplexnější informace je značná náročnost na prostor pro ukládání dat (Wagner ... [et al.], 2004).

Druhým způsobem modulace laserového záření je modulace sinusoidální. Princip určování vzdálenosti mezi aparaturou a povrchem je založen na znalosti vlnové délky, počtu prošlých celých period signálu a fázového posunu mezi průběhem emitovaného a přijatého paprsku (Wehr; Lohr, 1999).

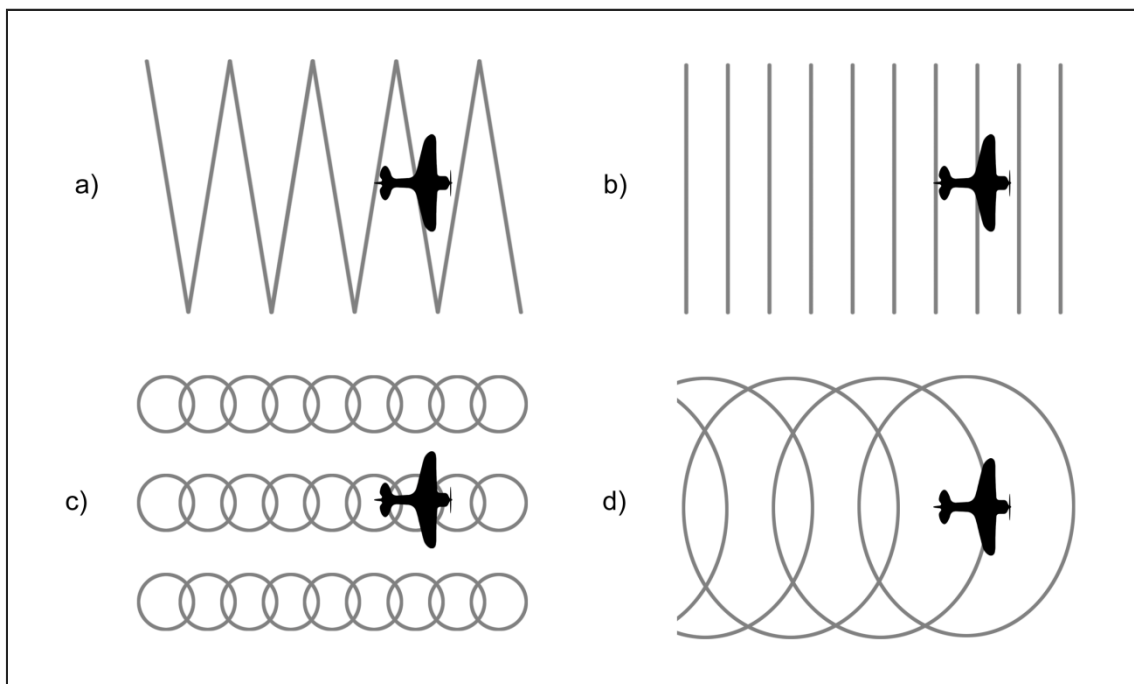
Zatímco systémy s pulzní modulací dosahují přesnosti v měření vzdálenosti přibližně 2 – 3 cm (Lemmens, 2007), druhá skupina nabízí přesnost až milimetrovou (Morin, 2002). Navzdory tomu se většina výrobců komerčních zařízení přiklání k první variantě a zařízení se sinusoidální modulací jsou využívány pouze k výzkumným a pokusným účelům (Pfeifer; Briese, 2007).

2.2.2 Skener

Aby se sběr dat co nejvíce zefektivnil, realizuje se snímání povrchu zároveň ve dvou směrech, což značně zvětšuje velikost plochy, jíž lze nasnímat během jednoho přeletu. Pohyb v podélném směru (směr letu) je zajištěn samotným pohybem nosiče, kterým mohou být, kromě nejčastěji využívaných letadel, také helikoptéry nasazované zejména v nepřehledném silně členitém terénu (Pfeifer; Briese, 2007). Výška letu je poměrně variabilní s obvyklými hodnotami mezi 400 a 1000 m (Baltasvicius, 1999a).

Vychylování měřicího paprsku v příčném směru zajišťuje skener. Úhel, pod kterým jsou paprsky k povrchu vysílány, se označuje jako zorné pole skeneru. Jeho velikost se tradičně pohybuje od 7 do 30 stupňů (Pfeifer; Briese, 2007), moderní systémy však dovolují pracovat až s dvojnásobně velkým úhlem (Lemmens, 2007). Velikost zorného pole udává společně s výškou letu a skenovací frekvencí hustotu bodů ve směru skenování. Obecně platí, že s rostoucí frekvencí skenování, nízkou letovou výškou a malým zorným polem se hustota zvětšuje a naopak. Na konečné hustotě bodů ve směru letu se pak podílí především letová rychlost nosiče (Wehr; Lohr, 1999).

Orientace paprsku požadovaným směrem je nejčastěji realizována pomocí odrazu od oscilujícího zrcátka. To se pohybuje kyvadlově, čímž se laserová stopa formuje do typického tvaru „zubaté“ křivky (Obr. 1a). Přednostmi tohoto řešení jsou kontinuální snímání povrchu a možnost nastavit velikost zorného pole skeneru dle momentální potřeby. Hlavní slabinou je nerovnoměrná hustota bodů ve směru kolmém na směr letu, která se od nadiru k okrajům zorného pole zvyšuje, což je projevem snižování rychlosti zrcátka před změnou směru jeho pohybu (Morin, 2002). Tento problém eliminuje použití rotačního zrcátka s konstantní rychlostí pohybu. Povrch je pak navíc skenován v pravidelné struktuře paralelních pruhů (Obr. 1b), což může podstatně usnadnit pozdější zpracování dat. Na druhou stranu je v pravidelných intervalech paprsek vychylován mimo snímání povrchu (do prostoru letadla), což negativně ovlivňuje hustotu pokrytí ve směru letu. Do značné míry lze tento nedostatek zmírnit záměnou jednoduchého zrcátka za hranol s více odraznými plochami (Morin, 2002). Kromě výše uvedených systémů popisují Morin (2002) i Wehr a Lohr (1999) ještě méně častá řešení jakými jsou Palmerův skener (Obr. 1d) či skener optickými vlákny (Obr. 1c). První jmenovaný je typický eliptickou laserovou stopou, díky níž je každý bod terénu skenován dvakrát, čehož lze využít v případě, že se některý bod nepodaří zaměřit již při prvním měření (Morin, 2002) nebo při kalibraci snímacích zařízení (Pfeifer; Briese, 2007). Druhá skupina skenerů využívá svazku optických vláken, pomocí nichž je laserový paprsek orientován k povrchu vždy pod stejným úhlem. Při distribuci paprsku mezi laserem a příslušným optickým vláknem je využíváno opět rotační zrcátko a stejně je řešen i přenos odraženého paprsku zpět k detektoru (Wehr; Lohr, 1999). V porovnání s ostatními způsoby poskytují tyto skenery vyšší skenovací frekvenci, daní za to je však skenovací úhel pouhých 7 stupňů (Wehr; Lohr, 1999).



Obr. 1 Stopa laserového paprsku při použití různých typů skeneru. a) skener s oscilujícím zrcátkem, b) skener s rotačním zrcátkem, c) skener s optickými vlákny, d) Palmerův skener
(zdroj: Morin, 2002; vlastní zpracování)

V souvislosti se skenery Wehr a Lohr (1999) dále konstatují, že i při snímání pod stále stejným úhlem dochází vlivem geometrie snímání k postupnému zvětšování oblasti, z níž se záření odráží v rámci jednoho měření a to směrem od nadiru k okrajům zorného pole. Dále upozorňují na deformace laserové stopy vlivem výškové členitosti snímaného povrchu. Výškovou proměnlivost terénu lze přitom obecně považovat za zdroj komplikací. Problematické je např. snímání ploch, jejichž normála se blíží kolmici na směr laserového paprsku (velmi slabý odraz). Náročnější je také následný proces filtrace dat, jež byla pořízena ve výškově členitých oblastech (viz kap. 2.3.2).

2.2.3 Navigační a kontrolní jednotka

Úkolem navigační jednotky (POS = position and orientation system) je co nejpřesněji stanovit polohu měřicí aparatury v době měření. K tomu účelu jsou na palubu nosiče instalována zařízení GPS a IMU, jež poskytují údaje s přesností do 10 cm (Wehr; Lohr, 1999). Pro jednoznačné určení polohy je přitom nezbytné monitorovat šest pohybů nosiče, jež jsou analogií šesti prvkům vnější orientace používaných v LF a odpovídají pohybu podél základních os třírozměrného prostoru (x, y, z) a dále rotacím podél těchto tří os (Kalvoda ... [et al.], 2004).

IMU se skládá ze skupiny gyroskopů měřících náklony nosiče (rotační pohyby) a akcelerometrů, schopných ze znalosti výchozí polohy a změny zrychlení ve třech základních směrech dopočítat polohu v době měření. Je tedy zřejmé, že pro určení všech šesti polohových parametrů by postačovalo pouze zařízení IMU. V praxi se však využívá v kombinaci s GPS přijímačem, což umožňuje eliminovat chyby, ke kterým by docházelo při měření jednotlivými

zařízeními odděleně (Kilian ... [et al.], 1996). Ve snaze dosáhnout co nejpřesnějších výsledků je aplikován postup diferenciálního GPS (DGPS). Ten vychází z předpokladu, že měření polohy na dvou velmi blízkých přijímačích jsou zkreslena obdobnými chybami (např. vlivem atmosféry, hodinami družice,...). Proto se do systému zavádí tzv. referenční stanice se známými velmi přesně zaměřenými souřadnicemi. Ta zároveň měří svoji polohu s využitím družicového signálu, přičemž porovnání polohy získané z družic s polohou předem známou umožňuje stanovit odchylky. Z nich jsou následně vypočteny potřebné korekce a těmi jsou dále zpřesňována měření probíhající na oněch velmi blízkých zařízeních (v našem případě nosič měřicí aparatury) (Čábelka, 2008).

Vzhledem k tomu, v jak krátkých časových intervalech měření probíhá, je velmi důležitá precizní synchronizace všech zúčastněných zařízení. Proto jsou systémy ALS vybaveny také kontrolní jednotkou, která pomocí signálu PPS (pulse per second) synchronizuje časy v jednotlivých zařízeních s časem získaným z přijímače GPS (Morin, 2002).

2.3 Primární zpracování dat

Pokud pomineme naměřené údaje o odrazivosti, lze tvrdit, že data pořízená metodou ALS popisují snímaný povrch a objekty, jež se na něm nacházejí, prostřednictvím souřadnic definujících jejich polohu v trojrozměrném prostoru. Taková reprezentace povrchu bývá označována zkratkou DSM (digital surface model) a kromě průběhu terénu popisuje také veškeré entity na něm jako vegetaci, budovy, dopravní prostředky, mosty, prvky rozvodné sítě atd. Celá řada aplikací však požaduje pouze data představující konkrétní objekty (např. pouze terén). Z tohoto důvodu je nezbytné pořízená data patřičně zpracovat. Postupy, které se dnes využívají, rozděluje Axelsson (1999) do tří skupin:

- Jako **filtraci** označuje algoritmy, jejichž cílem je jednak odstranit data, která prokazatelně představují chybná měření či nežádoucí šum a dále také data popisující jiné než požadované objekty. Nejčastěji se filtrace využívá pro odstraňování vegetace a nadzemních objektů vytvořených člověkem za účelem extrakce DTM (digital terrain model), tedy modelu, jež popisuje pouze průběh terénu.
- **Klasifikace** si klade za cíl, zařadit jednotlivé zaměřené body do předem vymezených kategorií (zástavba, vegetace, ...).
- Posledním způsobem zpracování dat je **modelace**, která se pokouší generalizovat data představující jednotlivé objekty a vytvářet zjednodušené reprezentace těchto objektů v podobě modelů.

Kromě kategorizace dle cíle jednotlivých postupů, lze provést také dělení vycházející z podoby vstupních dat. Laserová data jsou nejčastěji zpracovávána buď přímo, tedy ve formě původního bodového mračka, nebo až poté, co jsou transformována do pravidelného rastru (případně gridu). Oba přístupy přitom mají své výhody i nevýhody. Nejčastěji uváděným kladem přímého zpracování je zachování původní přesnosti dat. Brzank a kolektiv (2005) uvádějí, že rastrová reprezentace vykazuje nižší přesnost, jež je důsledkem interpolačních

technik, prostřednictvím nichž byl rastr vytvářen. Typickým projevem je shlazování povrchu (Wild; Krzystek; Madani, 1996), čímž se mohou potlačit důležité rysy terénu (hrany, vrcholy,...), jejichž zachování je nezbytné pro některé typy terénních analýz. Kromě toho je rastrový model zcela nevhodný pro uchovávání informací pořízených díky několikanásobnému odrazu paprsku od povrchu (každý pixel nese vždy pouze jedinou výškovou informaci) a kvůli omezenému prostorovému rozlišení jej nelze využít ani v některých specifických úlohách (monitoring energetických sítí) (Axelsson, 2000). Na druhou stranu jsou pixely v rastrové reprezentaci uspořádány do pravidelné struktury, což znatelně usnadňuje návrh a implementaci vyvíjených algoritmů. Tato výhoda je však poněkud sporná, neboť lze namítnout, že rastr nabízí pro určité úlohy analýzu pouze ve čtyřech základních směrech, což nemusí být vždy dostačující. Briese (2004) pak ve prospěch rastru uvádí, že zpracování dat v této podobě je často méně náročné jak po stránce časové, tak z hlediska nároků na výpočetní výkon počítače.

Níže jsou nejprve stručně popsány základní postupy využívané při transformaci bodového mračna na rastr a dále jsou stručně přiblíženy nejčastější přístupy k filtraci dat a tvorbě DTM. Z filtračních algoritmů je pozornost věnována zejména tradičním postupům, které popisují např. Dolanský (2004), Morin (2002), Bretar et al. (2004) či dvojice autorů Vosselmann a Sithole (2004). Aplikace klasifikačních a modelačních postupů je více spjata se zpracováním konkrétních úloh a v práci jsou proto okrajově popsány pouze v případech, kdy jsou součástí některého z prezentovaných postupů. Kromě toho je třeba uvést, že podrobný popis jakýchkoli postupů zdaleka přesahuje rámec této práce a pro detailní seznámení tak lze pouze odkázat na publikace citovaných autorů.

Význam následujících kapitol spočívá, mimo jiné také v tom, že DTM v rastrové podobě slouží jako zdroj vstupních dat pro algoritmus detekující terénní hrany vyvíjený v rámci této práce.

2.3.1 Transformace bodového mračna do rastrové podoby

Pro transformaci bodového mračna na rastr se využívají interpolační techniky. Obecně lze interpolaci popsat jako proces odhadující prostorové rozložení hodnot určité veličiny na základě omezeného množství známých hodnot. Omezeným množstvím je v této definici míněn konečný počet bodů v prostoru, na nichž byla daná veličina měřena. Zjednodušeně je možné říci, že pokud jsme naměřili hodnoty nějaké veličiny pouze v určitých bodech, interpolace nám napomůže zjistit, jakých hodnot tato veličina nabývá v prostoru mezi těmito body. V případě transformace bodového mračna na rastr je úkolem interpolace stanovit, na základě předem definovaných matematických a statistických postupů, hodnoty nadmořské výšky ve všech pixelech nově vytvářeného rastru. V mnoha geoinformatických (ale i dalších) publikacích je problematika interpolací velmi podrobně rozpracována a nemá proto smysl zde detailně rozebírat jednotlivé interpolační postupy. Dále bude uveden pouze stručný přehled nejfrekventovaněji používaných metod a jejich popis vztažený na příklad interpolace nadmořských výšek.

Nejjednodušším způsobem interpolace je **lineární interpolace**. Při výpočtu se předpokládá lineární změna nadmořské výšky mezi zaměřenými body. Pokud bychom situaci převedli do 1D, budou odhadnuté hodnoty mezi dvěma body ležet na přímce, která těmito body prochází. Metoda lineární interpolace je využívána také při vytváření TIN. TIN je nepravidelná síť trojúhelníků, jejichž vrcholy jsou představovány body původního mračka. Způsobů, kterými lze trojúhelníky mezi body sestavit existuje mnoho, jedním z neoptimálnějších pro TIN reprezentující zemský terén je Delaunayova triangulace. Tato triangulace je implementována také v softwaru ArcGIS Desktop, který byl v této práci pro generování TIN používán. Vytvoření TIN může představovat mezikrok, při vytváření rastru. Výška pixelu v rastru může být určena tak, že je nalezen trojúhelník, do kterého se promítne jeho střed. V prostoru představuje plocha trojúhelníku rovinu, která prochází všemi jeho vrcholy. Hledaná nadmořská výška odpovídá nadmořské výšce této roviny v bodě, kam se promítnul střed řešeného pixelu. V ArcGIS je tento způsob označován jako *Linear* a byl využit pro transformaci testovacích dat na rastr v rámci této práce. Důležitou vlastností tohoto postupu je, že neshlazuje průběh terénu a lépe tak zachovává terénní hrany, což bylo pro jejich následnou detekci zásadní.

Mezi relativně jednoduché metody lze zařadit také metodu ***Inverse Distance Weighting*** (IDW). Výpočet představuje vážený průměr nadmořských výšek bodů, které se nacházejí nejbližší k místu, ve kterém je interpolovaná hodnota zjišťována (střed pixelu). Váhy jsou přitom nepřímo úměrné vzdálenosti mezi tímto místem a jednotlivými body, které se na výpočtu podílejí (Ježek, 2008). Kolik nejbližších bodů bude do výpočtu vstupovat, lze předem omezit, na výpočtu se však mohou podílet i všechna dostupná měření. Hlavní myšlenka této metody je, že body nacházející se od řešeného místa nejbližší, budou mít na výslednou hodnotu větší vliv, než body, které se nacházejí ve větších vzdálenostech.

Spline zpracovává vstupní body po částech a prostor mezi nimi prokládá polynomickými funkcemi různých stupňů. Vždy však musí být splněny minimálně dvě podmínky. Funkce, na sebe musí v jednotlivých bodech spojitě navazovat (musí mít totožnou derivaci) a křivost interpolovaného povrchu musí být minimální. Díky těmto kritériím má povrch zachycený ve výsledném rastru velmi hladký průběh. Zvláštností metody spline je, že interpolované hodnoty mohou být vyšší než maximální naměřená nadmořská výška a nižší než naměřená výška minimální (Křikavová, 2009).

Kriging je geostatistická metoda odhadu prostorové proměnné, kterou je v našem případě nadmořská výška terénu. Metoda je založena na váženém průměru, jehož váhy vycházejí z variogramu vyjadřujícího míru nepodobnosti jednotlivých dostupných bodových měření. Míra nepodobnosti přitom sleduje vztah mezi vzájemnou vzdáleností jednotlivých zaměřených bodů a rozdílem jejich nadmořských výšek. Geostatistická teorie je značně obsáhlá a pro její podrobnější studium lze doporučit studijní text (Ježek, 2008).

2.3.2 Filtrace laserových dat

2.3.2.1 Morfologické filtry

Jde o skupinu filtrů postavených na teoretickém aparátu matematické morfologie. Ta původně operovala pouze s binárními obrazy, postupem času však došlo k aplikaci základních principů také na šedotónové obrazy a dokonce i na data ve vektorové podobě (Dolanský, 2004). V nejjednodušší podobě jsou binární obrazy chápány jako bodové množiny dat, na které jsou aplikovány čtyři základní operace – dilatace, eroze, otevření a zavření. Dilataci lze popsat jako Minkowského sumu bodové množiny původního obrazu s bodovou množinou strukturního elementu (Siblík, 2007). Zjednodušeně lze říci, že dilatací dochází k zaplnění děr a „zálivů“ ve vyobrazených objektech a jejich celkovému plošnému zvětšení. Duální operací k dilataci je eroze, která představuje Minkowského rozdíl zmiňovaných bodových množin (Siblík, 2007) a vede k odstranění objektů menších než strukturní element, smazání částí objektů vystupujících z jejich obrysu a jejich celkovému zmenšení. Kromě toho lze opakovanou erozi využít také při skeletonizaci obrazu. Kombinace dilatace a eroze v uvedeném pořadí se při použití totožného strukturního elementu označuje jako zavření. Tato operace vede k vyplnění mezer a propojení blízkých objektů při zachování rozměrů původních objektů. Naopak eroze následovaná dilatací, neboli otevření, eliminuje části obrazu menší než strukturní element (Siblík, 2007).

Aplikací poznatků matematické morfologie na data ALS v rastrové podobě se zabýval např. Kilian et al. (1996), který pro odlišení bodů nacházejících se na terénu a mimo něj využívá operaci otevření v modifikované podobě pro šedotónové obrazy. Základní myšlenka je poměrně prostá a předpokládá, že výškový rozdíl mezi body terénu a body ostatními (vegetace, budovy,...) je výrazně větší, než výškový rozdíl mezi body terénu navzájem. Nejprve je definován strukturní element neboli maska (nejčastěji ve tvaru čtvercové matice) požadované velikosti a prahová hodnota. Maska je pak pomyslně umístěna nad původní rastr a postupně jsou analyzovány pixely nacházející se pod ní. Nejprve je nalezen pixel s nejnižší hodnotou, který je klasifikován jako bod na terénu. Pokud je rozdíl hodnot ostatních pixelů pod maskou a pixelu představujícího terén menší než prahová hodnota, předpokládá se, že se jedná o body na terénu a naopak. Pro zpracování celého rastru se maska postupně posunuje a celý proces se opakuje (Kilian ... [et al.], 1996). Kritickým místem této metody je volba velikosti masky. V případě, že je maska příliš malá, může dojít k situaci, kdy všechny pixely pod ní představují např. střechu rozsáhlého komplexu budov. Tyto pixely by pak byly chybně vyhodnoceny jako pixely povrchu. Na druhou stranu se zvětšující se maskou roste nebezpečí, že budou chybně odfiltrovány i některé plošně nevýrazné terénní prvky jako odtokové rýhy, násypy apod. Tento nedostatek lze do jisté míry odstranit iterativním zpracováním s postupně se zvětšující velikostí masky. Pixelům, které by byly při využití dané velikosti masky vyhodnoceny jako terén jsou přiřazovány váhy odvíjející se od použité velikosti masky (větší maska = větší váha a naopak). Po dokončení všech iterací lze pak na základě analýzy vah jednotlivých pixelů přesněji odhadnout, které jsou skutečně součástí terénu a které nikoli (Kilian ... [et al.], 1996).

Dolanský (2004) přidává k výše uvedeným slabinám také selhávání algoritmu ve výškově členitých oblastech a pro zlepšení výsledků navrhuje aplikaci tzv. dual-rank filtru. Tento postup nejprve vzestupně seřadí hodnoty pixelů spadajících pod masku a následně na základě zvoleného pořadí (rank) vybere jednu, která dále vystupuje v prováděných morfologických operacích. Pokud je rank např. 1, bude vybraná hodnota nejmenší možná a následná morfologická operace se bude rovnat šedotónové erozi. Naopak bude-li rank roven počtu pixelů pod maskou jedná se patrně o maximum a odpovídající operací bude šedotónová dilatace. Hlavní princip však spočívá v postupné aplikaci dvou operací po sobě. Pokud položíme hodnotu ranku rovnu r a počet pixelů pod maskou roven n , první operace bude prováděna s hodnotou odpovídající r a druhá s hodnotou $n - r + 1$ (Eckstein; Munkel, 1995). Přestože možnost nastavit rank činí tuto metodu poměrně variabilní, Zhang et al. (2003) uvádí, že limitující je stále ještě velikost masky a Bretar et al. (2004) dodává, že i přes dosažení zajímavých výsledků se ani v případě sofistikovanějších algoritmů postavených na základech dual-ranku nepodařilo eliminovat veškeré pixely, jež nepřísluší terénu.

Principů matematické morfologie využívá také Zhang et al. (2003) popisující metodu progresivních morfologických filtrů, které oproti dosavadním postupům nepracují s rastrem ale s původním bodovým mračenem. Jeho cílem je zejména odstranit závislost algoritmu na velikosti masky a dále zpřesnit proces určování, zda bod je či není bodem ležícím na terénu. Obdobně jako Kilian et al. (1996) využívá iterativní aplikace šedotónového otevření a postupně se zvětšující masky. Navíc vychází z předpokladu, že zatímco v případě budov je nárůst výšky velmi strmý v případě terénu se výšky mění značně pozvolněji. Z tohoto důvodu sleduje rozdíl mezi původní výškou jednotlivých bodů a jejich výškou po zmiňovaném otevření. Pokud je výškový rozdíl menší než aktuální hodnota dynamicky proměnlivého prahu, lze usuzovat, že bod popisuje terén a naopak. Hodnota prahu se přitom mění v závislosti na velikosti aktuálně použité masky a sklonu terénu v území, které maska vymezuje (Zhang ... [et al.], 2003).

2.3.2.2 Filtry založené na porovnání sklonu

Podobně jako v případě výše popisovaných filtrů je i zde stěžejní předpoklad, že výrazný rozdíl výšek mezi dvěma blízkými body je způsobem spíše objekty na terénu než tvarem terénu samotného. Navíc je zde kladen důraz na zohlednění vzdálenosti mezi porovnávanými body. Funkce výšky a vzdálenosti pak představuje sklon spojnice mezi body a lze očekávat, že s rostoucím sklonem klesá pravděpodobnost, že by výše položený bod náležel terénu (Vosselman, 2000). Finální filtrace dat spočívá v postupném porovnávání sklonu mezi jednotlivými body a body v jejich okolí se sklonem definovaným na základě předem stanovené prahové funkce.

Je zřejmé, že správnost filtrace se odvíjí od vhodně zvolené prahové funkce. Tu je možné, v případě že známe maximální sklon ve skenovaném území, nepřímo odhadnout. Nebo lze předem vymezit testovací území, které zachycuje typický průběh terénu ve snímané oblasti, provést jeho analýzu a na jejím základě požadovanou funkci stochasticky definovat. Tento způsob zabraňuje chybné filtraci bodů náležících k terénu a navíc činí algoritmus velice

přízpůsobivý různým typům povrchu. Oba výpočty mohou být navíc prováděny pouze s daty spadajícími do určitého intervalu spolehlivosti, což umožňuje eliminovat vliv šumu a chybových měření (Vosselman, 2000).

Za jednu z výhod této metody Vosselman (2000) uvádí, že dokáže pracovat přímo s původním bodovým mračnem, čímž lze předejít negativním projevům transformace na rastr. Morin (2002) pak upozorňuje, že je třeba věnovat zvláštní pozornost bodům příslušícím rozlehlým budovám. V takových případech algoritmus úspěšně odfiltruje pouze okrajové části budov, body tvořící střední části je však nezbytné odfiltrovat dodatečně. Původní algoritmus popisovaný výše byl v průběhu času několikrát inovován (např. (Sithole, 2001), (Roggero, 2001)), čímž se podařilo zmiňované nedostatky alespoň částečně potlačit.

Morin (2002) řadí mezi filtry založené na sklonu také algoritmus představený Axelssonem (2000). Postup, kterým je zpracováváno původní bodové mračno lze rozdělit do několika fází. Nejprve jsou ze všech naměřených bodů vypočteny statistické údaje, na jejichž základě jsou odvozeny prahové parametry pro provedení prvního cyklu filtrace. Dále jsou ručně vybrány body, které náleží terénu a z těch je vygenerován základní TIN reprezentující primární terén. Poté se testuje, zda jednotlivé body z mračna přísluší terénu či představují jiné objekty. Hodnotí se přitom kolmá vzdálenost jednotlivých bodů k rovině nejbližšího trojúhelníku a velikost úhlů mezi touto rovinou a spojnicemi analyzovaného bodu s uzly daného trojúhelníku. Pokud hodnoty odpovídají v úvodu stanoveným prahovým hodnotám, je bod považován za terén a naopak. Následně jsou všechny nově určené body zakomponovány do TINu a vypočteny prahové parametry pro další cyklus. V každé iteraci je přitom nad (resp. pod) každým trojúhelníkem určován pouze jediný bod a celý algoritmus se opakuje do doby, než jsou klasifikovány všechny body mračna (Axelsson, 2000).

2.3.2.3 Filtry s využitím lineární predikce

Také tato skupina filtrů používá jako vstupní zdroj dat původní bodové mračno. V prvním kroku je ze všech dostupných bodů aproximován výchozí model terénu. Lze očekávat, že takto odhadnutý terén bude probíhat v jakési „střední“ výšce mezi body terénu, vegetace, budov atd. Vzdálenosti jednotlivých bodů od aproximovaného povrchu jsou označovány jako residua a z výše uvedeného vychází, že zatímco body náležící terénu budou mít residua záporná u zbývajících bodů tomu bude právě naopak. Hodnoty residuí hrají rozhodující roli při určování vah jednotlivých bodů, přičemž platí, že váha bodů s výrazně zápornými residui bude rovna jedné a body s výrazně kladnými residui dostanou váhu nulovou. V případě bodů, jejichž residua se blíží nule, je váha vypočtena na základě speciální funkce, jejíž definice vychází z histogramu residuí jednotlivých bodů. Obecně je však zachován trend, že záporná residua vedou k vyšším vahám a opačně. Poté je z vážených výšek jednotlivých bodů odhadnut nový průběh terénu a celý proces se iterativně opakuje do doby, než hodnota residuí spadá do předem stanovených mezí. (Kraus; Pfeifer, 1998).

Při hodnocení tohoto postupu uvádí Morin (2002) velmi dobré výsledky při filtraci plošně rozlehlých budov a vegetace. Také konstatuje, že aproximace metodou nejmenších čtverců vede ke shlazení povrchu, což se pozitivně projeví zejména při následném generování vrstevnic, které pak vykazují přirozenější průběh. Na druhou stranu je to právě metoda nejmenších čtverců prováděná pro všechny body mračna, která činí algoritmus výpočetně velmi náročným (Morin, 2002).

Myšlenku výše uvedeného postupu dále rozvíjeli např. Schickler a Thorpe (2001), kteří vychází z dat v podobě TINu a při výpočtu průběhu terénu využívají znalosti terénních hran a výškových bodů či tento výpočet dále zpřesňují zakomponováním podmínek omezujících sklon a křivost terénu.

2.4 Letecké laserové skenování v Česku

Data, pomocí nichž byly vytvářeny a následně testovány algoritmy vyvíjené v praktické části této práce, byla pořízena během nejrozsáhlejšího sběru výškopisných dat od doby vzniku samostatné České republiky. Cílem následující kapitoly je popsat základní parametry, v současnosti stále probíhajícího, leteckého laserového skenování, kterého je při vytváření nového výškopisu Česka využíváno a představit vlastnosti dat, která jsou během skenování získávána.

Pro potřeby státní správy bylo letecké laserové skenování na území Česka poprvé použito v roce 2006 při pilotním projektu, který společně zaštiťovaly Český úřad zeměměřičský katastrální (ČÚZK) a Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad (VGHMÚř) sídlící v Dobrušce. Záměrem bylo otestovat potenciál této metody pro podmínky v Česku a porovnat přesnost získaných dat s daty, které v té době oba úřady využívaly. Výsledkem bylo stanovení letových výšek, které jsou pro snímání českého terénu optimální (Pavelka, 2011).

Masivní nasazení ALS přichází s Projektem tvorby nového výškopisu území České republiky, který byl započat v roce 2009 s plánovaným rokem dokončení 2015. Část projektu zahrnující naskenování celého území ČR by měla být dokončena již v roce 2012. Na realizaci projektu se podílí ČÚZK, Ministerstvo obrany ČR a Ministerstvo zemědělství ČR (Šíma, 2011). Primárním cílem je nahradit stávající výškopisná data, která jsou značně zastaralá a která nesplňují dnešní nároky na přesnost ani hustotu pokrytí. Ještě v nedávné minulosti bylo pro celé Česko k dispozici pět digitálních modelů terénu, z toho čtyři vycházející z dat pořízených během vojenského mapování ČSSR v letech 1952 až 1957, jehož výsledkem byla mapa v měřítku 1 : 25 000, a následného civilního a vojenského mapování v letech 1957 až 1971 pro tvorbu mapy v měřítku 1 : 10 000. Pátý DTM byl vytvořen na základě stereofotogrammetrického vyhodnocování měřických snímků v letech 2003 až 2008 (Brázdil, 2010). Přehled dostupných výškopisných dat pro území celého Česka z doby před leteckým laserovým skenováním nabízí tabulka 1.

Tab. 1 Výškopisná data pro území Česka (stav před ALS)(zdroj: Brázdil, 2010)

Název databáze	Obsah	Střední chyba výšky (přesnost)
ZABAGED® - výškopis	Vektorizované vrstevnice ZM 10 uložené jako 3D objekty ve formátu DGN	0,7 – 1,5 m v odkrytém terénu 1 – 2 m v intravilánech 2 – 5 m v zalesněných územích
ZABAGED® - zdokonalený výškopis	Aktualizované a zpřesněné vrstevnice ZM 10, doplněné o terénní hrany náspů, výkopů, břehů, nádrží apod.	0,7 – 1,5 m v odkrytém terénu 1 – 2 m v intravilánech 2 – 5 m v zalesněných územích
ZABAGED® - mříž 10 × 10 m	Odvozený model z databáze ZABAGED® - zdokonalený výškopis do formy mříže (GRID) 10 × 10 m	1,5 – 2,5 m v odkrytém terénu 2 – 3 m v intravilánech 3 – 7 m v zalesněných územích
DMR 2,5. generace	Výškový model ve formě mříže (GRID) 100 × 100 m	3 – 5 m v odkrytém terénu 5 – 8 m v intravilánech 10 – 15 m v zalesněných územích
DMR 3. generace	Výškový model ve formě nepravidelné sítě TIN získaný stereofotogrammetrickou metodou	1 – 2 m v odkrytém terénu 1 – 2 m v intravilánech 3 – 7 m v zalesněných územích

pozn.: DSM (digitální model povrchu) v té době neexistoval

Pro účely ALS bylo území Česka rozděleno do tří pásem. Jako první bylo zpracováno pásmo Střed (2009 – 2010), dále pásmo Západ (2010 – 2011) a skenování bude zakončeno pásmem Východ (2011 – 2012)(Brázdil, 2010). Data jsou pořizována v blocích, jejichž rozměry mohou být v závislosti na vertikální členitosti terénu 10 × 10 km, 10 × 20 km nebo 10 × 30 km, a jejichž orientace odpovídá souřadnicové síti referenčního systému UTM / WGS 84 (Šíma, 2011). Jako optimální byly stanoveny dvě střední výšky letu nad terénem. Pro oblasti s nadmořskou výškou nepřesahující 700 m n. m. je to výška 1 500 m, pro výše situovaná území je doporučovaná výška pouze 1 250 m. Bloky jsou snímány v páslech, které jsou dány letovými drahami. Pro výšku letu 1 500 m byla vzdálenost mezi drahami stanovena na 833 m, což zajišťuje překryt pásů až 59 % (min. překryt 45 %). Díky tomu se výrazně zvýší výsledná hustota zaměřených bodů (až dvojnásobně) a eliminují se případy, kdy je povrch zastíněn a nemůže tak být patřičně nasnímán. Pro nižší letovou výšku 1250 m, se překryt pohybuje v rozmezí od 30 do 64 % (Brázdil, 2010).

Laserové skenování bylo prováděno zařízením Litemapper 6800, které se skládá z laserového skeneru Riegl LMS Q-680, záznamového zařízení, palubní aparatury GPS Nova Tel a inerciální měřické jednotky od firmy IGI (Šíma, 2011). Systém využívá full-waveform laserovou měřicí jednotku, schopnou určit vzdálenost od snímaného povrchu s přesností 0,02 m. Maximální hodnota divergence laserového paprsku činí 0,5 mrad a jednotlivé pulsy mohou být k povrchu vysílány až s frekvencí 240 kHz. Vychylování paprsku ve směru kolmém na směr letu zajišťuje rotující zrcátko a zorné pole skeneru zabírá úhel 60 °. Střední souřadnicová chyba v určení polohy aparaturou GPS činí 0,1 m. Přesnost IMU je charakterizována střední chybou měření úhlů, jejíž hodnota se pohybuje od 0,003 ° do 0,007 °.

V srpnu 2011 byla kompletně naskenována pásma Střed a Západ (informace poskytnutá přímo od ZÚ). Poloha bodů byla zaměřena souřadnicemi v systému UTM (zóna 33 N, elipsoid WGS-84) a nadmořské výšky bodů byly vztaženy k referenčnímu elipsoidu. Z tohoto systému byla data následně převedena také do souřadnicového systému JTSK s výškami uvedenými ve výškovém systému Balt – po vyrovnání. V důsledku překrývání jednotlivých pásů činila výsledná průměrná hustota bodů 1,6 bodu / m². Právě z těchto dat byla vybrána čtyři testovací území, která byla využita v praktické části práce. Bližší popis jednotlivých území lze nalézt v samostatné kapitole věnované použitým datům (kap. 5.1).

Aby bylo základní představení leteckého laserového skenování v Česku kompletní, zbývá ještě uvést, k jakému cíli Projekt tvorby nového výškopisu území České republiky směřuje. Bylo uvedeno, že hlavní prioritou je inovovat výškopisná data a nahradit doposud dostupné modely terénu, které již v mnoha odvětvích lidské činnosti nevyhovují dnešním potřebám. Konkrétními výstupy by měly být dva nové digitální modely terénu označované jako DMR 4G a DMR 5G a také první digitální model povrchu vytvořený pro území Česka s názvem DMP 1G (viz tab. 2). Při zpracovávání těchto produktů se bude, kromě dat z ALS, využívat také Ortofoto ČR, dosavadní výškopisná data a data získaná geodetickými měřeními. Softwarové zázemí by měly tvořit především dva produkty a to SCOP++ vyvíjený firmou INPHO GmbH a ArcGIS od společnosti ESRI. Od programu SCOP++ se očekává zejména automatizovaná filtrace bodového mračna a klasifikace bodů do tříd zástavba, vegetace, terén a chybná měření (Brázdil, 2010).

Tab. 2 Výstupy z Projektu tvorby nového výškopisu území ČR (zdroj: Brázdil, 2010)

Označení modelu	Celý název (popis)	Předpokládaná střední chyba výšky (přesnost)
DMR 4G	Digitální model reliéfu území České republiky 4. generace (GRID 5 × 5 m)	0,3 m v odkrytém terénu 1 m v zalesněných územích
DMR 5G	Digitální model reliéfu území České republiky 5. generace (TIN)	0,18 m v odkrytém terénu 0,3 m v zalesněných územích
DMP 1G	Digitální model povrchu území České republiky 1. generace (TIN)	0,4 m pro prostorově přesně vymezené objekty (budovy) 0,7 m pro objekty přesně neohraničené

3 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ

Dříve než bude možné vymezit pojem linie terénní kostry, je nezbytné vysvětlit samotný pojem terén a několik dalších základních termínů. Hned na začátku je třeba připomenout, že již v úvodu bylo deklarováno, že se tato práce zabývá pouze těmi liniemi terénní kostry, které v terénu představují terénní hranu.

Podle české státní normy upravující geodetické a kartografické názvosloví (ČSN 73 0401) je terén definován jako „část zemního povrchu (pevniny) tvořená terénním reliéfem, pokrytým objekty jako např. porostem, vodstvem, komunikacemi, stavbami, technickými zařízeními“ (VÚGTK, c2005-2011). Obdobně jej specifikuje také Talhofer (2008), který uvádí, že terén představuje „libovolnou část zemského povrchu se všemi jeho nerovnostmi, vytvořenou přírodními silami nebo uměle, se všemi objekty a jevy, které se na zemském povrchu nacházejí“. Poněkud odlišně je na terén nahlíženo v geoinformatice, kde je popisován pouze jako „holý“ povrch ve všech jeho tvarových modifikacích, vytvořený působením přírodních sil a činností člověka. Takové pojetí je v terminologii státních norem bližší spíše pojmu terénní reliéf, který je definován jako „zemský povrch vytvořený přírodními silami nebo uměle bez objektů a jevů na něm“ (VÚGTK, c2005-2011). V souladu s touto definicí jsou vymezeny také základní typy modelů zemského povrchu – digitální model terénu (digital terrain model = DTM) a digitální model povrchu (digital surface model = DSM)(také kap. 2.3), které jsou v geoinformatice hojně využívány. Geoinformační pojetí terénu je v této práci považováno za rozhodující a v souladu s ním je zpracován celý následující text práce.

Studiem terénu se zabývají především dvě vědní disciplíny. Geomorfologie zkoumá tvary zemského reliéfu, procesy vedoucí k jeho vzniku a jeho stáří (Demek, 1987). Využívá přitom poznatků z geologie, klimatologie, hydrologie a v širším kontextu ji lze zařadit mezi disciplíny fyzické geografie. Zcela jiným způsobem k terénu přistupuje topografie, jejímž hlavním cílem je studium tvarů zemského povrchu a objektů na něm, za účelem jejich popisu, zaznamenávání, měření a znázorňování nejčastěji v podobě plánů a map (VÚGTK, c2005-2011). Svým přístupem se tak řadí k technicky zaměřeným vědním disciplínám, jakými jsou např. kartografie či geodézie.

Protože je průběh reálného terénu značně složitý, je při jeho popisu nezbytné aplikovat jistá zjednodušení. Geomorfologie proto využívá tzv. geometricky jednoduché plochy a lomy spádu, které od sebe oddělují jednotlivé geometricky jednoduché plochy, vzniklé působením různých geomorfologických procesů nebo stejných procesů působících v různých směrech (Demek, 1987). Právě lomy spádu přitom významově odpovídají terénním hranám, jejichž detekce je hlavním tématem této práce. Mezi typické terénní hrany popisované Demkem (1987) patří zejména hřbetnice a údolnice. Vysvětlení těchto pojmů je následující a vychází z normy ČSN 73 0402:

- **hřbetnice** – linie vznikající v místě styku dvou přilehlých svahů téhož hřbetu, která má ze všech spádníků na ploše hřbetu nejmenší sklon
- **údolnice** – linie vznikající v místě styku dvou přilehlých svahů téhož údolí, kopírující svým průběhem místa největšího vyhloubení v údolí; ze všech spádníků nacházejících se v údolí má údolnice nejmenší sklon

Analogicky se v topografii při generalizaci terénu využívá topografických bodů, čar terénní kostry a zejména topografických ploch (VÚGTK, c2005-2011), jejichž kombinací získáváme základní topografické tvary. Terénní kostra bývá v literatuře někdy označována jako orografické schéma a kromě údolnic a hřbetnic definovaných výše ji tvoří (Veverka; Zimová, 2008):

- **terénní hrany** nacházející se v místech, kde v terénu dochází k výrazné změně sklonu
- **tvarové čáry** vymezující vodorovné nebo mírně skloněné části terénních tvarů
- **spádnice** procházející místy největšího sklonu topografické plochy
- **body** (vrcholy kup a sedel, dna kotlin), v nichž se rovina rovnoběžná s rovinou referenční plochy dotýká plochy topografické tak, že v bezprostředním okolí bodu dotyku mají společný pouze tento jediný bod

Kromě toho uvádějí Veverka a Zimová (2008) ještě úpatnice, ty jsou však pouze zvláštním typem terénní hrany a proto zde nejsou popsány jako samostatný prvek.

Obecně lze tedy konstatovat, že prvky terénní kostry představují místa, kde v terénu dochází k nějaké změně jeho průběhu. Podobně jako znalost vrstevnic nám i znalost prvků terénní kostry umožňuje vytvoření základní představy o konkrétní podobě terénu. Díky tomu lze říci, že data popisující terénní kostru mají společně s vrstevnicemi vyšší informační hodnotu, než ostatní data popisující průběh terénu (Wild; Krzystek; Madani, 1996). Tohoto potenciálu je pak možné velmi výhodně využít v geoinformatice při vytváření digitálních modelů terénu a jejich generalizaci (Brugelmann, 2000).

Z geoinformačního pohledu je neméně důležité také matematické chápání terénu, jako funkce dvou proměnných. Definujeme-li prostor pomocí trojrozměrného kartézského souřadnicového systému s označením os x , y , z (z představuje svislou osu) a ztotožníme-li rovinu referenční plochy s rovinou rovnoběžnou s osami x , y , lze nadmořskou výšku popsat jako funkci polohy definované souřadnicemi x a y . Kromě toho nabývá reálný terén i tvarů, které se této definici vymykají (převisy, jeskyně). Jedná se však o relativně výjimečné případy a

v datech používaných v této práci se neobjevují. Pro běžný průběh terénu platí, že významné body terénní kostry lze z matematického pohledu vyjádřit analogicky jako v topografii. Terénní hrany je možné definovat jako linie spojující body, v nichž funkce představující povrch nabývá lokálních maxim křivosti.

4 PUBLIKOVANÉ ZPŮSOBY DETEKCE LINIÍ TERÉNNÍ KOSTRY

Detekce hran, v datech popisujících terén, je v odborné geoinformační společnosti poměrně frekventované téma a v minulosti se jím zabývala řada autorů. Jejich práce se vzájemně liší v aplikovaných postupech, v datovém modelu vstupních dat, v přesném vymezení detekovaných tvarů (hran), ve způsobech dalšího využití obdržených výsledků, v univerzálnosti publikovaného přístupu a mnoha dalších aspektech. V souvislosti s tím, lze jednotlivé metody členit do různých kategorií, přičemž se nabízí zejména rozčlenění dle datového modelu vstupních dat a dle základního principu, na němž je metoda postavena. V prvním případě je situace jednoduchá a zpracovávána jsou buď data v podobě původního bodového mračka, nebo ve formě rastru. Při kategorizaci na základě stěžejního principu je variabilita větší a lze vymezit přístupy využívající analýzu odtokových poměrů, hranové operátory, hodnoty křivosti a gradientu funkce aproximující reálný terén, hledání průsečnic rovin v prostoru atd. Ve snaze nabídnout co možná nejvíce automatizovaný postup však často dochází k situaci, kdy postupy kombinují jak různé druhy vstupních dat, tak výpočetní aparát. Z tohoto důvodu nebyly níže uvedené postupy násilně zobecňovány a popisovány v rámci obsahově vymezených kapitol, ale byl upřednostněn individuální rozbor prací vybraných autorů ve snaze popsat každý jednotlivý způsob zpracování dat jako celek. Výběr autorů byl zaměřen především na ty, kteří publikovali nové postupy, z nichž další autoři vycházejí, a pozornost byla věnována také autorům, na jejichž práce je často odkazováno v odborné literatuře. Není-li uvedeno jinak, vychází následující text vždy z práce autora (autorů) jmenovaného v názvu kapitoly.

4.1 O'Callaghan, Mark (1984)

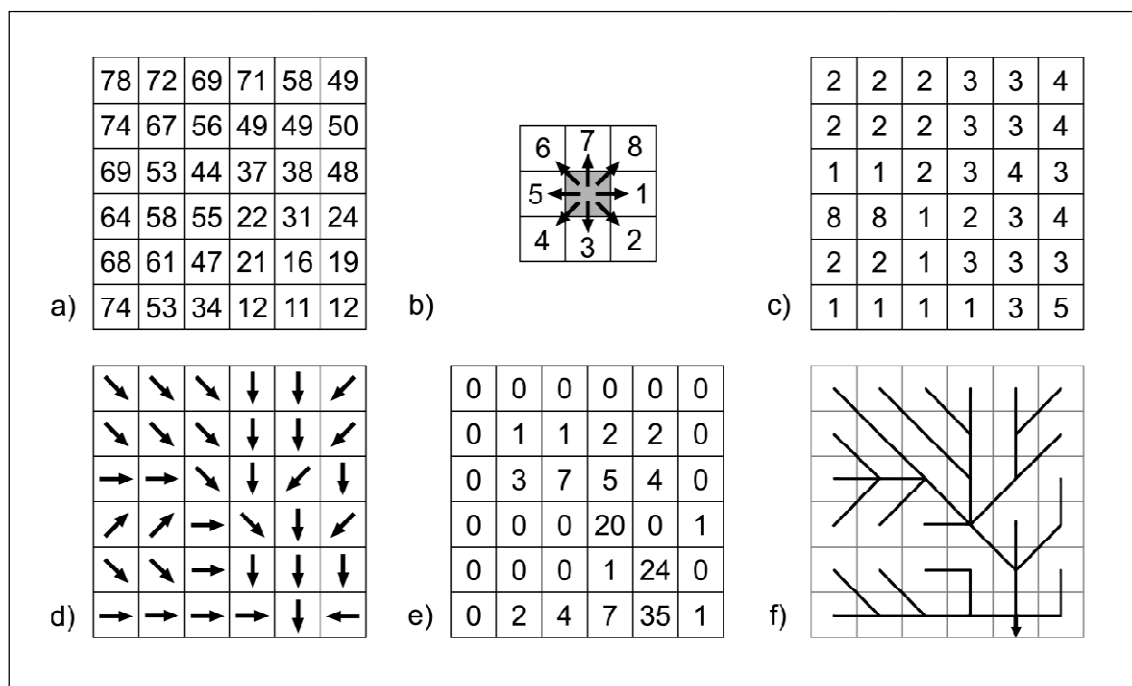
Přestože metody zaměřené na analýzu odtokových poměrů v území byly původně navrženy zejména pro potřeby hydrologie a geomorfologie, Kraus a Pfeifer (2001) konstatují, že je lze výhodně využít také při hledání linií terénní kostry. Prací, které se tomuto tématu věnují je značné množství, jen Meisls, Raizman a Karnieli (1995) ve své rešerši odkazují na deset různých publikací. Pro představení základního principu byl vybrán přístup O'Callaghana a

Marka (1984), z něhož řada pozdějších prací vychází a který byl v různých modifikacích implementován také do systémů GIS (např. ArcGIS, GRASS GIS).

Autoři se ve své práci zaměřují na dva hlavní cíle. Jedním je lokalizovat v DTM místa, která v reálném terénu odpovídají místům, v nichž je akumulován největší povrchový odtok (tradičně vodní toky). A druhým eliminovat nežádoucí bezodtoké oblasti, které se ve skutečném terénu neobjevují, a které znemožňují korektní provádění hydrologických a geomorfologických analýz. Tyto terénní sníženiny jsou neblahým důsledkem interpolačních technik využívaných při získávání DTM v rastrové podobě, jež je vstupním zdrojem informací o terénu. Kromě dvou hlavních cílů jsou během výpočtů jako vedlejší efekt získány informace o průběhu rozvodnic, definována povodí jednotlivých toků apod.

Dříve než je zahájen samotný výpočet, doporučují autoři provést vyhlazení terénu. Díky tomu je možné částečně potlačit výše uvedené chyby v DTM vzniklé při jeho pořizování. Poté je vytvořen pomocný rastr, ve kterém je každému pixelu přiřazena hodnota 1, 2, ... 8 vyjadřující směr odtoku v daném místě (Obr. 2b a Obr. 2c). Stanovení směru odtoku probíhá tak, že jsou procházeny pixely v okolí řešeného pixelu a hledán ten, který leží nejnižší (jeho výšková hodnota je nejmenší). Zde je třeba si uvědomit, že čtyři pixely v rozích okolí jsou od středového pixelu dále než čtyři zbývající a jejich výšku je tedy nezbytné před porovnáním patřičně korigovat. Pokud je výška nalezeného pixelu zároveň menší než výška řešeného pixelu, lze tvrdit, že odtok probíhá směrem k tomuto pixelu. V ideálním případě je takto každému pixelu v rastru přiřazen jeden z osmi základních směrů (Obr. 2c a Obr. 2d). V praxi však dochází také k případům, kdy je všech osm pixelů tvořících okolí položených výše, než řešený pixel. Právě tímto způsobem se projevují bezodtoké oblasti v DTM a tyto situace je nezbytné ošetřit (viz níže). Na základě nově získaného rastru se směry odtoku je vytvořen další rastr, v němž jsou pixely klasifikovány do čtyř tříd. Pokud do pixelu nesměruje odtok z žádného jiného pixelu (nemá přítok) a je pro něj definován směr odtoku (má odtok), jedná se o pixel na rozvodnici. Navazuje-li na pixel právě jeden přítok i odtok, je klasifikován jako součást toku. Pokud má pixel více přítoků než jeden a právě jeden odtok, je označen jako soutok. Čtvrtý případ nastává ve chvíli, kdy pixel nemá žádný odtok, což je opět důsledkem výše zmiňovaných defektů v DTM. Dále lze prostřednictvím analýzy propojení pixelů skrze přítoky a odtoky vytvořit rastr znázorňující rozdělení pixelů do odtokových oblastí (povodí) jednotlivých toků. Díky tomu jsou definována také povodí, z nichž je voda odváděna do bezodtokých oblastí. V tuto chvíli je možné výskyt těchto nežádoucích oblastí potlačit. V okolí nejnižší položeného pixelu (dno oblasti) je nalezen pixel s nejmenším výškovým rozdílem a tok je následně veden tímto směrem. Takto se postupuje, dokud nově vytvářený tok nedosáhne hranice povodí původní bezodtoké oblasti. Zde je nezbytné upozornit na skutečnost, že dochází pouze ke změnám ve směru odtoku v příslušných pixelech a nikoli k změnám jejich výšky v DTM. Pro korektní určení odtokových poměrů však autoři uvádějí toto řešení jako postačující. Posledním krokem je extrakce odtokových drah (říční síť) (Obr. 2f). Provádí se iterativním výpočtem, v němž jsou kumulativně sčítány počty přítoků v jednotlivých pixelech. Pixely, které nemají žádný přítok získávají hodnotou nula. Bude-li odtok z takovýchto dvou pixelů směřovat do třetího pixelu, pak bude

hodnota třetího pixelu dva. Jak bylo již uvedeno, hodnoty se sčítají kumulativně, takže pokud budou do jednoho pixelu směřovat odtoky z pixelů s hodnotami 2 a 3, bude výsledná hodnota pixelu v místě soutoku 7 (součet hodnot 2, 3 a dvakrát hodnoty 1). Celá situace je názorně předvedena na Obr. 2e. Konečnou podobu říční sítě lze ovlivnit zadáním minimální prahové hodnoty. Síť pak bude tvořena pouze z pixelů, jejichž hodnota je vyšší než prahová. V praxi to znamená, že s rostoucí prahovou hodnotou klesá podrobnost říční sítě (je zanedbáno více pixelů) a naopak.



Obr. 2 Analýza odtokových poměrů – ilustrace jednotlivých kroků (význam obrázků popsán v textu)
(zdroj: <http://www.weather.gov/oh/hrl/gis/data.html>; zpracování vlastní)

Z uvedeného popisu vyplývá, že lze tento postup využít především při hledání údolnic (kopírují říční síť) a hřbetnic (odpovídají rozvodnicím). Terénní hrany, které vznikají např. náhlou změnou sklonu svahu detekovat nelze. Zároveň také není možné určit, do jaké míry ovlivňují nalezené údolnice a hřbetnice celkový ráz terénu. Z výsledného rastru nemůžeme např. vyčíst, zda nalezené linie představují hluboká údolí se strmými srázy nebo naopak pozvolná údolí, kde svahy stoupají jen velmi pozvolně.

4.2 Wild, Krzystek, Madani (1996)

V úvodu své práce autoři připomínají, že pro dosažení kvalitního morfologicky přesného DTM je nezbytné zohlednit také průběhy terénních hran. Uvádějí, že většina dostupných software je sice schopna takovou funkcionalitu poskytnout, ovšem pouze v případě, že jsou jim informace o průběhu terénních hran předány jako součást vstupních dat. Uživatel je tedy nucen získat tato data ještě před vytvářením DTM. Wild, Krzystek a Madani (1996) proto představují metodu,

v níž je proces detekce terénních hran zapracován přímo do procesu generování DTM, čímž se nároky kladené na uživatele výrazně minimalizují.

Navrhovaný postup je založený na analýze křivosti a torze vstupního rastru. Při zpracování je využíváno tzv. adaptivního filtru chránícího hrany (v orig. *adaptive edge preserving filter*), který je implementován v softwaru MATCH-T. Adaptivní filtr je rozšířením původního filtru chránícího hrany a na rozdíl od svého předchůdce dokáže před filtrací ochránit také hrany, které nejsou rovnoběžné s osami souřadného systému, do něž je DTM zasazen. Kromě toho v sobě zahrnuje také robustní statistický aparát, který umožňuje eliminovat vliv šumu a náhodných chyb ve vstupních datech. Cílem adaptivního filtru je nalézt ve vstupním rastru místa, kde hodnota křivosti nabývá lokálního maxima. Tato místa představují primární odhad terénních hran, u nichž lze dále stanovit jejich směr na základě směru, ve kterém je křivost povrchu maximální. V této fázi jsou potenciální terénní hrany znázorněny jako řetězce tvořené samostatnými body. Protože bodová reprezentace není pro popis hran příliš ideální jsou body propojeny do 3D polylinií, k čemuž je využíváno informací o směru hran v jednotlivých bodech. Získané 3D polylinie jsou hrubou aproximací skutečné terénní hrany. V dalším kroku je rastr zpracován pomocí Sobelova hranového operátoru (Obr. 3ab), čímž jsou nalezeny další potenciální hrany. Výsledné hrany, které skutečně odpovídají hranám nacházejícím se v reálném terénu, jsou následně detekovány v místech, kde se nalezené 3D polylinie polohově shodují s odhadnutými hranami Sobelovým operátorem. Na závěr je výsledný DTM přepočítán tak aby zohledňoval existenci terénních hran, čímž jsou v okolí hran odstraněny rozdíly mezi průběhem modelu a skutečného terénu.

a)

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

c)

-1	0	1
-1	0	1
-1	0	1

e)

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

b)

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

d)

1	1	1
0	0	0
-1	-1	-1

f)

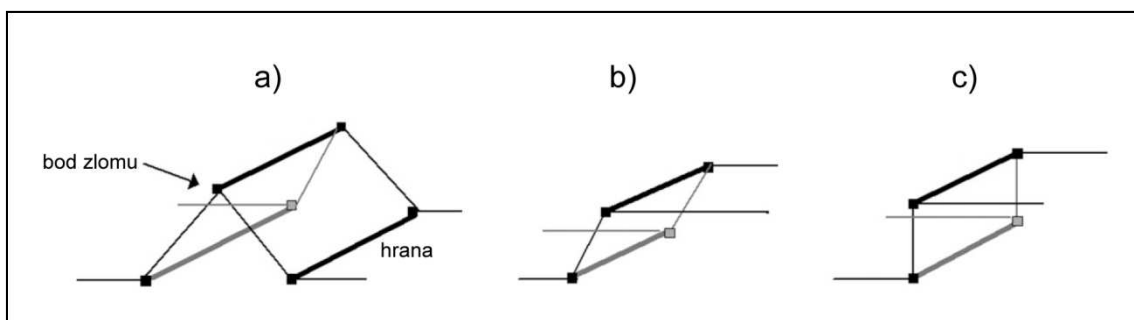
1	1	1
1	-8	1
1	1	1

Obr. 3 Hranové operátory. a) Sobelův vertikální, b) Sobelův horizontální, c) Prewittův vertikální, d) Prewittův horizontální, e) Laplaceův dvousměrný, f) Laplaceův čtyřsměrný

4.3 Gomes Pereira, Wicherson (1999)

Autoři se ve své práci snaží odpovědět na otázku, zda je možné využít data pořízená metodou ALS při hydrodynamickém modelování. V souvislosti s tím představují způsob, jak v datech detekovat terénní hrany, které mohou výrazně ovlivňovat odtokové poměry v území. Jejich výzkum je zaměřen na oblast Nizozemí, kde se nachází přibližně 40 % území pod úrovní hladiny moře a hydrodynamické modelování zde má značný význam.

Terénní hrany jsou v této práci definovány jako spojnice bodů zlomu, které identifikují místa náhlé změny sklonu terénu. Představeny jsou tři základní geometrická primitiva – střecha, svah a schod (Obr. 4), které slouží k aproximaci skutečných hran nacházejících se v reálném terénu. Pro hrany odpovídající typu schod se předpokládá, že náleží zejména budovám, mostům a dalším neterénním objektům. Vzhledem k tomu, že zaměřené body představující tyto objekty byly z dat odstraněny již během filtrace, není nadále tento typ hran při detekci zohledněn. Z uvedeného popisu tak vyplývá, že detekce zde bude zaměřena zejména na tvary, jako jsou vyvýšeniny, násypy, hráze apod. Vyhledáním dalších linií terénní kostry (údolnice, hřbetnice) se práce explicitně nezabývá, nicméně algoritmus by bylo možné aplikovat i pro tyto typy hran.



Obr. 4 Základní geometrická primitiva. Zleva střecha, svah a schod

(zdroj: Gomes Pereira; Wicherson, 1999)

Pro odhadnutí průběhu terénních hran autoři využívají Prewittova hranového operátoru (Obr. 3cd), což je postup tradičně aplikovaný při zpracování digitálního obrazu. Operátor představuje diskrétní aproximaci první derivace obrazové funkce a jeho použití se projeví zvýrazněním míst, kde dochází k náhlé změně hodnot pixelů. Následující postup spočívá v tom, že je vytvořen nový rastr, ve kterém jsou pixely klasifikovány jako pixely v rovině nebo pixely na svahu. Všem pixelům v rovině je přiřazena hodnota nula zatímco pixely na svahu nabývají hodnoty odpovídající sklonu svahu v daném místě. Do rastru jsou přitom vkládány pouze ty hodnoty sklonu, které jsou větší než předem definovaná prahová hodnota. Tímto způsobem vznikají souvislé plochy nul a hodnot vyjadřujících sklon. Finální nalezení bodů zlomu je realizováno prostřednictvím operace ztenčování. Vychází se přitom z předpokladu, že pixely představující hrany se nachází na rozhraních vytvořených souvislých oblastí nového rastru. V každém pixelu s nenulovou hodnotou je procházeno osm pixelů v jeho nejbližším okolí a testuje se, zda aspoň jeden z nich má hodnotu nula a zároveň aspoň jeden hodnotu představující sklon. V takovém případě je pixel ve středu testovaného okolí označen jako pixel na hraně a naopak. V závěru jsou nalezené hrany převedeny do vektorové podoby, přičemž jim jsou automaticky přiřazeny atributy popisující, zda se jedná o hranu ohraničující svah shora či zdola.

Autoři v závěru upozorňují, že takto vygenerované linie trpí nežádoucí roztržitostí a výsledky navíc obsahují i velmi malé hrany, které nemají pro popis terénu žádný význam. Proto doporučují dodatečnou ruční editaci výstupních dat a provedení jejich kontrolu s výsledky z předchozích let či z jiných datových zdrojů.

4.4 Gomes Pereira, Janssen (1999)

Ve svém výzkumu se zabírají využitím laserových dat pro plánování nizozemské dálniční a silniční sítě. Vhodnost dat posuzují především z hlediska požadované přesnosti a množství informace, které lze z dat získat. Zde rozlišují, zda data nesou pouze informaci o geometrii objektů a tvarů, jež reprezentují, nebo je možné získat také sémantickou informaci, která napomáhá jejich bližší identifikaci (např. rozlišit mezi zpevněnými a nezpevněnými plochami). Jako důležitý nositel informace o tvaru terénu a objektech na něm jsou označovány terénní hrany, které jsou v případě terénu částečně schopny kromě geometrické informace poskytnout také informaci sémantickou (např. zda se jedná o horní či dolní hranu svahu).

Při hledání terénních hran v rastrovém DTM s prostorovým rozlišením 1 m aplikovali ruční i automatické postupy. Pro usnadnění manuálního zpracování založeného na tradiční vizuální interpretaci, doporučují zobrazení dat ve formě rastrového obrazu znázorňujícího nadmořskou výšku, či využití perspektivního a stereoskopického zobrazení dat. Automatická detekce byla postavena na diskrétní konvoluci s využitím Laplaceova hranového operátoru jako konvoluční masky (Obr. 3ef). Postup přitom vychází z teorie zpracování digitálního obrazu, kdy je Laplaceův operátor, představující aproximaci druhé derivace obrazové funkce, používán pro nalezení hranic mezi homogenními plochami v obraze. Jako negativum Laplaceova operátoru je uváděna značná náchylnost k šumu, který je dále zvýrazňován. Tento fakt může v případě velice podrobných laserových dat zatížených různými odchylkami způsobovat detekování hran v místech, kde se ve skutečnosti nenacházejí (Brugelmann, 2000). Problém se šumem lze do jisté míry řešit kombinací Laplaceova operátoru s Gaussovým filtrem, která bývá v odborné literatuře často označována jako LoG (Brugelmann, 2000).

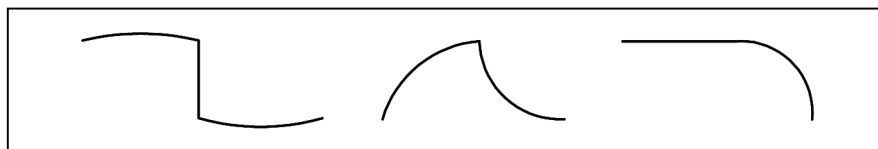
Výsledkem ručního i automatického zpracování jsou 2D linie představující průmět terénních hran do horizontální roviny. Mají-li být linie dále převedeny do 3D, doporučují autoři využít sofistikovanějších přístupů než pouhé lineární interpolace mezi jednotlivými segmenty. Jako příklad uvádějí, že v úsecích, kde mají linie přímkový průběh, lze sestavit rovinu, kterou přímka prochází a která je kolmá na rovinu horizontální, a výsledné 3D linie vypočítat z průsečnice nově vytvořené roviny rovinou (plochou) terénu.

Ze závěrečného porovnání výsledků ruční a automatické detekce hran vyplývá, že v případě automatického zpracování je nalezeno mnohem více hran než v druhém případě. Kromě toho vykazují výsledky stejné nedostatky, na jaké bylo upozorňováno již v popisu práce (Gomes Pereira; Wicherson, 1999) a autoři opět doporučují dodatečnou korekci výsledků uživatelem. V souvislosti se získáváním sémantických informací z laserových dat bylo konstatováno, že v omezené míře lze využít údajů o odrazivosti laserového paprsku. Pro podrobnější informace je však nezbytné kombinovat data ALS s daty z jiných zdrojů, kterými mohou být letecké a družicové snímky či existující databáze GIS.

4.5 Brugelmann (2000)

Autorka poukazuje na skutečnost, že zatímco v rastrových modelech terénu a modelech TIN, jsou informace o tvaru zemského reliéfu vyjádřeny pouze implicitně, znalost průběhu terénních hran poskytuje tyto informace přímo. Obecně definuje terénní hrany v podobě 3D vektorových linií jako spojnice míst, v nichž nabývá hodnota křivosti povrchu maximálních hodnot oproti okolí a za základní typy hran považuje údolnice, hřbetnice a hrany nacházející se na terénních tvarech, jež významně ovlivňují charakteristický průběh terénu. Dále uvádí, že znalost průběhu terénních hran je velmi důležitá pro některé oblasti lidské činnosti (např. vodní hospodářství a protipovodňová ochrana) a připomíná využití při vytváření morfologicky korektních modelů terénu.

Detekci terénních hran zahrnula autorka do procesu segmentace výškového rastru (hodnota pixelů odpovídá nadmořské výšce povrchu v daném místě), jehož cílem je popsat průběh terénu pomocí základních geometrických primitiv, jimiž jsou souvislé tvarově homogenní plochy a terénní diskontinuity. K segmentaci lze přistupovat dvěma způsoby. První je založen na klasifikaci všech pixelů v rastru podle hodnoty křivosti povrchu v daném místě a následném shlukování pixelů s blízkými hodnotami do homogenních oblastí. Druhý, častěji využívaný přístup, spočívá v přímém odhalení terénních diskontinuit a jejich rozdělení na hrany představující skok, přehyb nebo plynulý přechod (volný překlad termínů *jump edge*, *crease edge* a *curvature edge*)(Obr. 5). V souvislosti s tímto druhým přístupem autorka uvádí možné nasazení hranových operátorů používaných při zpracování obrazových dat. Zároveň však upozorňuje, že dobré výsledky lze očekávat pouze v případě skokových hran, jež jsou typické především pro modely povrchu (DSM) (např. v místě budov) a v modelech terénu (DTM) se vyskytují jen velmi zřídka.



Obr. 5 Typy terénních hran. Zleva skok, přehyb a plynulý přechod (zdroj: Brugelmann, 2000)

Nový přístup, který Brugelmann (2000) prezentuje, se řadí k technikám přímo odhalujícím terénní diskontinuity a zaměřuje se zejména na nalezení hran typu přehyb a plynulý přechod. Do značné míry vychází z metodiky navržené Förstnerem (1998), která vychází z předpokladu, že pixel představující hranu leží na hranici dvou homogenních oblastí a míra homogenity tak musí být značně rozdílná v místě hrany a v přilehlých oblastech. Navíc předpokládá, že míra homogenity nabývá lokálního maxima ve směru kolmém na hranu. (Förstner, 1998). Výpočet míry homogenity vychází z výpočtu gradientu pro jednotlivé pixely v rastru. Z hodnot gradientu je vytvořen dvoukanálový rastr, první kanál obsahuje hodnoty gradientu ve směru osy x a druhý hodnoty gradientu ve směru osy y . Na základě tohoto rastru je vypočtena míra homogenity označovaná jako kvadratická variace, která zohledňuje hodnoty maximální a minimální

normálové křivosti terénu v místě právě řešeného pixelu. Následnou modifikací míry homogenity v závislosti na předpokládaném šumu v datech je získána výsledná hodnota, která je statisticky testována a na základě testu je stanoveno, zda se jedná o pixel představující hranu či nikoli (Brugelmann, 2000).

Brugelmann (2000) výše uvedený postup dále rozšiřuje a představuje komplexní metodiku zpracování laserových dat převedených do rastrové podoby, na jejímž konci jsou získány 3D linie terénních hran ve vektorové formě. Poukazuje na skutečnost, že výpočetní aparát prezentovaný Forstnerem (1998) využívá výpočtu prvních a druhých derivací obrazové funkce, což výrazně zesiluje negativní působení nežádoucího šumu. Doporučuje proto provést před výpočtem míry homogenity vyhlazení obrazu pomocí Gaussova filtru, který dokáže působení šumu potlačit. Následně jsou statistickým testováním nalezeny pixely, u nichž je vysoká pravděpodobnost, že reprezentují terénní hranu. Tyto pixely vytvářejí poměrně široké pruhy, což je pro přesnou lokalizaci hran silně nevhodné. Nabízející se řešení tohoto problému je aplikace morfologické operace ztenčování. Tento způsob však autorka zavrhuje, neboť jsou tak nalezeny geometrické středy pruhů a nikoli skutečný průběh hran. Místo toho navrhuje detekci založenou na analýze křivosti terénu, přičemž platí výše uvedený předpoklad, že se hrany nacházejí v místech lokálních maxim křivosti povrchu. Až po tomto kroku, který lokalizaci hran výrazně zpřesňuje, uplatňuje techniku morfologického ztenčení, čímž jsou eliminovány zbývající nadbytečné pixely narušující liniový tvar hran. Výšková informace je jednotlivým pixelům přiřazena z rastru vyhlazeného Gaussovým filtrem, čímž se odstíní negativní projevy šumu. V posledním kroku je provedena vektorizace pixelů znázorňujících hrany a generalizace jejich tvaru ve směru rovnoběžném s osami x y , což odstraní nepřírozenou zubatost linií, jež je typickým projevem vektorizace rastrových dat.

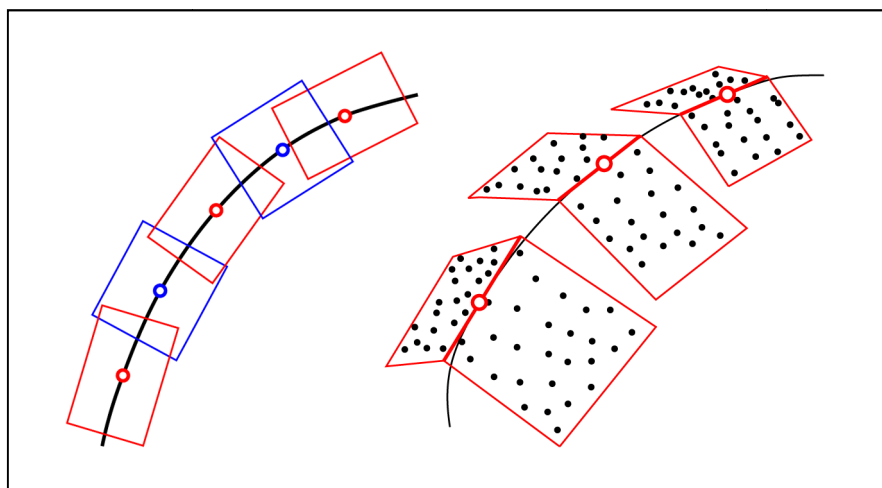
4.6 Kraus, Pfeifer (2001)

Publikace přináší ucelený přehled metod a postupů pro zpracování dat ALS, které byly vyvinuty na půdě Institutu fotogrammetrie a dálkového průzkumu, jež je výzkumným pracovištěm Technické univerzity ve Vídni. Autoři zde vedle filtračních a interpolačních technik představují také postup pro extrakci a modelaci linií terénních hran založený na přímém zpracování nepravidelného mračka zaměřených bodů.

Kromě bodového mračka je pro realizaci popisovaného postupu nezbytné dodat ještě informace o přibližném průběhu terénních hran v zájmové oblasti. Pro inicializace procesu přitom vystačíme pouze s odhadem průběhu hran popisujícím jejich polohu v horizontální rovině. Budeme-li nadále operovat v prostoru definovaném kartézským systémem souřadnic (osy x , y , z), kde je svislá osa označena jako z , je horizontální rovinou míněna rovina rovnoběžná s osami x , y . Pro získání odhadů hran doporučují autoři využít některého z výše popisovaných řešení zaměřených na zpracování dat v rastru. V několika následujících krocích bude porovnávána vzájemná poloha bodů v mračku a odhadnutých linií. V takových případech

se u bodů zanedbává souřadnice z , udávající nadmořskou výšku a vyšetřování polohy se tak přesouvá z prostoru do roviny totožné s rovinou, v níž leží odhadnuté hrany.

Samotný proces modelace hran začíná krokem, ve kterém je okolo každé odhadnuté hrany vytvořena obalová zóna s předem definovanou velikostí. Poté jsou ke každé hraně přiřazeny body, jež spadají do její obalové zóny a podle toho, na jakou stranu od hrany se nacházejí, jsou rozděleny do dvou skupin. Body tak reprezentují dva přilehlé svahy, které tvoří hledanou terénní hranu. Následný výpočet prostorových souřadnic hledané hrany spočívá v proložení bodů ležících na svazích dvěma rovinami a hledání jejich průsečnice, která odpovídá průběhu terénní hrany v daném místě. Tento výpočet je již realizován v prostoru (u bodů zahrnuta i souřadnice z) a při prokládání bodů rovinou je využíváno metody nejmenších čtverců. Svahy se přitom nezpracovávají jako celky, ale po malých částech podél odhadnuté hrany, které se vzájemně překrývají. Tyto malé části budou v následujícím textu označovány jako segmenty. Výpočet je navíc prováděn iterativně, ve snaze stanovit průběh hrany co nejpřesněji. Terénní hrana, která je výsledkem prvního cyklu tak opět rozděluje body ve svém okolí na dvě skupiny a výpočet se opakuje. Počet iterací lze stanovit předem nebo omezit podmínkou, aby se další výpočet již neprováděl v případě, kdy by se na aproximaci obou rovin svahů podílely stejné body jako v iteraci předchozí. Průběh terénní hrany je v každém segmentu popsán jednak nalezenou průsečnicí udávající směr hrany a dále jedním reprezentativním bodem nacházejícím se ve středu této průsečnice. Celá linie terénní hrany je získána proložení jednotlivých reprezentativních bodů splajnovou funkcí, přičemž tečnou této funkce je v každém bodě odpovídající průsečnice. V závěru autoři ještě doplňují, že namísto rovin je možné k proložení bodů na svazích využít i složitější plochy definované polynomy vyšších stupňů, které mohou ve velmi členitém terénu lépe popsat aproximované svahy. Princip výpočtu je zachycen na Obr. 6.



Obr. 6 Princip detekce terénních hran dle Krause a Pfeifera (2001). Vlevo prvotní odhad terénní hrany a její obalová zóna rozdělená na samostatné segmenty (pohled ve směru osy z). Vpravo perspektivní pohled s vybranými body pro aproximaci přilehlých svahů (zdroj: Kraus; Pfeifer, 2001)

4.7 Brieše (2004, 2009)

Výše uvedeným postupem se velice podrobně zabýval také Brieše (2004), který původní řešení nadále rozšiřuje. Konstatuje například, že je vhodné při aproximaci rovin přilehlých svahů zohlednit také kolmou vzdálenost jednotlivých bodů od odhadované hrany. Předpokládá, že svah může nabývat v různých částech různého tvaru, přičemž pro korektní určení průběhu terénní hrany je nejdůležitější popsat jeho chování v nejbližším okolí hrany. Navrhuje proto upravit vliv jednotlivých bodů na výpočet hrany pomocí vah, přičemž bodům nacházejícím se nejdál od terénní hrany jsou přiřazeny váhy nízké a naopak. Zde také uvádí zajímavý poznatek, když tvrdí, že bodům v těsné blízkosti terénní hrany by měla být přiřazena nízká váha, neboť při měření může docházet k částečnému odrazu laserového záření od obou svahů, což se může negativně projevit degradací přesnosti.

Autor dále zdůrazňuje, že detekci terénních hran přímo z bodového mračna odpadá potřeba data nejprve filtrovat (odstranit neterénní body), neboť tento krok lze realizovat jako součást procesu hledání hran. Pro naplnění tohoto cíle autor prezentuje implementaci principů lineární predikce, jež byla představena v kapitole 2.3.2.3.

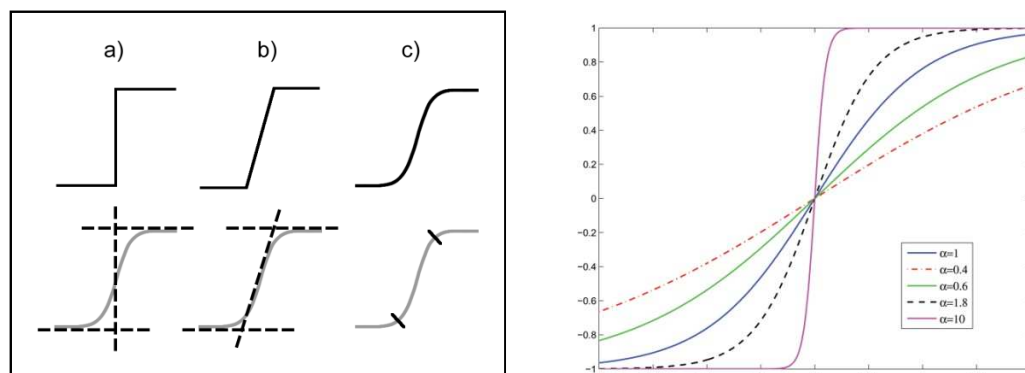
Brieše (2004) se také zabývá otázkou prvotního odhadu průběhu terénních hran, přičemž se snaží co nejvíce potlačit nutnost aplikovat postupy a metody určené ke zpracování rastrů. V souvislosti s tím představuje postup označovaný jako „narůstání hran“ (v originále „*3D breakline growing method*“). Namísto odhadnutých průběhů jednotlivých hran vystačí toto řešení pouze s odhadem části hrany, jež svojí délkou odpovídá velikosti jednoho segmentu (viz kap. 4.6). Poté je za pomoci postupů popsaných v předchozí kapitole vypočten přesný průběh hrany, čímž získáváme i její směr. Hrana je v tomto směru následně extrapolována na obě strany, kde jsou vypočteny příslušné segmenty, nalezeny body, které do nich spadají, a celý postup se opakuje. Kritériem pro provedení dalšího opakování může být např. maximální úhel mezi rovinami představujícími přilehlé svahy. Je-li aktuální úhel větší než prahová hodnota, hrana již není významná a proces opakování je zastaven. Hlavní nevýhodou tohoto řešení je, že není schopno reagovat na náhlé změny směru skutečné hrany (dojde k extrapolaci do směru, kam hrana ve skutečnosti nepokračuje) a selhává také v místech, kde se jedna hrana rozděluje na dvě (Brzank; Lohmann; Heipke, 2005).

Brieše (2004) ve své práci nastiňuje také postup, kdy pro inicializaci detekce hran postačuje znát pouze jediný bod reprezentující terénní hranu. Tento přístup je dále rozpracován v publikaci Brieše et. al. (2009), ve které se autoři zabývají vytvářením geomorfologicky přesných modelů z dat ALS, jež jsou následně využívány při hydrodynamických simulacích a hrají tak důležitou roli při protipovodňové ochraně. Autoři uvádějí, že pro libovolný bod z mračna lze s využitím bodů v jeho blízkém okolí vypočítat tzv. kvadriku neboli plochu druhého stupně. Ta je nositelem informace o podobě terénu v okolí vybraného bodu a její znalost umožňuje v kombinaci s aplikací metody hlavních komponent dopočítat hodnoty maximální a minimální křivosti terénu v daném bodě. Provede-li se tato operace nad všemi body v mračnu a vezmeme-li se v úvahu fakt, že terénní hrany jsou představovány body, v nichž dosahuje

maximální křivost vysokých hodnot, lze odhadnout, které body hranu představují a které nikoli. Autoři navíc uvádějí, že prahovou hodnotu křivosti, na jejímž základě je rozhodováno, zda bod představuje hranu či ne, je možné měnit a přizpůsobit tak výpočet aktuálním potřebám (např. přihlédnout k charakteristickým tvarovým rysům terénu). Kromě stanovení hodnot křivosti je možné díky metodě hlavních komponent odhadnout také směr terénní hrany, který odpovídá směru, v němž je křivost povrchu v daném bodě minimální. Tímto postupem jsou získány všechny vstupní údaje nezbytné pro spuštění procesu detekce terénních hran popsaného v předchozím textu.

4.8 Brzank, Lohmann, Heipke (2005)

Detekce terénních hran je v této publikaci prezentována jako důležitá součást výzkumu zaměřeného na sledování tvarových změn terénu v pobřežních oblastech Severního moře. Prostřednictvím terénních hran je možné popsat charakteristické morfologické tvary ve zkoumaných oblastech, jejichž změny lze následně analyzovat s pomocí dat pořízených v minulosti. Autoři uvádějí, že pro zájmové území jsou typické zejména tři typy terénních hran, jež jsou schematicky znázorněny na Obr. 7 vlevo.



Obr. 7 Typické tvary terénu, kde dochází ke vzniku hran a označení polohy rovin vzhledem ke grafu hyp. tangenty (vlevo). Grafy hyperbolické tangenty (vpravo) (zdroj 1: Brzank; Lohmann; Heipke (2005); zdroj 2: <http://www.biomedcentral.com/content/figures/1471-2105-8-S5-S2-9-l.jpg>)

Metoda, kterou autoři představují, vychází do značné míry z prací Kraus, Pfeifer (2001) a Briese (2004). Pro primární odhad linií terénních hran využívají Lanserův filtr pracující nad daty v rastrové podobě. Aplikací filtru jsou nalezeny pixely, které pravděpodobně představují hranu. Zda je tomu tak skutečně, je testováno na základě dvou prahových hodnot, které lze označit jako $g1$ a $g2$, přičemž platí, že $g1 > g2$. Nejprve jsou porovnávány hodnoty gradientu v jednotlivých pixelech s hodnotou $g1$. Pokud je hodnota gradientu v daném pixelu vyšší, předpokládá se, že pixel představuje hranu a naopak. Následně je u každého takového pixelu testováno osm pixelů v jeho okolí a ty, v nichž je hodnota gradientu vyšší než $g2$ jsou také označeny jako pixely hrany. Testování pixelů proti dvěma prahovým hodnotám je prováděno především za účelem eliminovat detekci velmi malých hran, které jsou často projevem šumu v datech.

Při extrakci a modelaci terénních hran z bodového mračka jsou v jednom kroku zpracovávány hned dvě terénní hrany. To je umožněno aproximací povrchu pomocí funkce hyperbolický tangens, jejíž možné grafy jsou zachyceny na Obr. 7 vpravo. Zatímco na grafu jsou pro zjednodušení znázorněny funkce jedné proměnné, při aproximaci terénu je využíváno funkce dvou proměnných. Autoři konstatují, že hyperbolický tangens s různými parametry dokáže velmi dobře reprezentovat skutečný průběh terénu mezi hranami, přičemž splňuje požadavek na nízký počet parametrů funkce. Na druhou stranu si uvědomují, že v případě malého počtu bodů mezi hranami (hrany blízko sebe) mohou být výsledky aproximace silně zkresleny. Před provedením samotné detekce je kromě primárních odhadů průběhu hran zapotřebí ještě definovat typ hran, které jsou pro zájmové území typické. Tento krok není automatizován a je nezbytné, aby tuto informaci vložil uživatel. V případě skokových hran (Obr. 7 vlevo a) jsou na základě funkce aproximující terén vypočteny dvě roviny procházející její horní a dolní horizontální částí. Poté je vypočtena třetí rovina, která graf funkce protíná v místě největšího sklonu, a která svírá s rovinou rovnoběžnou s osami x , y pravý úhel (vertikální rovina). Terénní hrany jsou následně dopočteny jako průsečnice prvních dvou rovin a roviny třetí. (schematicky znázorněno na Obr. 7 (vlevo a)). Podobně se postupuje i v případě svahových hran s tím rozdílem, že třetí rovina leží v rovině svahu (Obr. 7 vlevo b). Poslední typ hran, které se jeví jako plynulý přechod mezi dvěma různě skloněnými rovinami, je detekován vyhledáním míst, v nichž nabývá křivost funkce maximálních hodnot (Obr. 7 vlevo c).

Vyhledání hran v celé ploše zájmového území je řešeno po vzoru metody popisované v (Kraus; Pfeifer, 2001), kdy se postupuje po jednotlivých segmentech podél primárně aproximovaných 2D linií. V každé části jsou vypočteny dva body reprezentující hledané terénní hrany a v poslední fázi jsou všechny takto nalezené body proloženy splajnovou funkcí.

Z výše uvedeného popisu vyplývá, že toto řešení je silně závislé na tvaru terénu ve vyšetřovaném území. Autoři uvádějí, že pro pobřežní oblasti, v nichž byl postup testován, bylo dosaženo velmi dobrých výsledků (téměř 100 % úspěšnost). Nabízí se však otázka, do jaké míry a zda vůbec, by byl tento postup funkční např. v horských oblastech s tvarově rozmanitým terénem.

5 VLASTNÍ METODA DETEKCE LINIÍ TERÉNNÍ KOSTRY

Cílem této kapitoly je popsat praktickou část předložené diplomové práce. Nejprve budou představena data, která byla využívána při vývoji a testování navrhovaných algoritmů. Zde je zahrnuta stručná charakteristika oblastí, z nichž byla data získána, a popsán způsob transformace dat z původního formátu XYZ do podoby rastru. V další části je nastíněn stěžejní princip detekce terénních hran, na kterém jsou založeny veškeré navrhované algoritmy, a jsou uvedeny specifické rysy, s tímto způsobem zpracování spojené. Následuje přehled algoritmů, které byly v rámci praktické části vytvořeny s uvedením jejich kladů a nedostatků. Zvýšená pozornost je přitom věnována postupu, založenému na aplikaci kartografických generalizačních technik, který dosahoval nejlepších výsledků. Tento postup lze také označit za stěžejní výstup celé praktické části.

5.1 Data

Data, která byla během praktické části využívána, pocházejí ze čtyř různých lokalit na území Česka. Při výběru lokalit byl kladen důraz zejména na to, aby jednotlivá území reprezentovala morfologicky rozličné typy krajiny. Při závěrečném testování zpracovaných algoritmů tak bylo možné nejen stanovit, zda jsou funkční či nikoli, ale také určit pro jaké typy terénu je analýza nejúspěšnější a v jakých případech naopak výsledky neodpovídají očekávané kvalitě. Veškerá data pocházejí z právě probíhajícího leteckého laserového skenování Česka popsaného v kapitole 2.4 a spadají do pásma Střed. Každá oblast má čtvercový tvar s délkou strany 2 km. Popis lokalit je doplněn blokdiagramem, znázorňujícím 3D vizualizaci terénu dané oblasti a topografickým schématem.

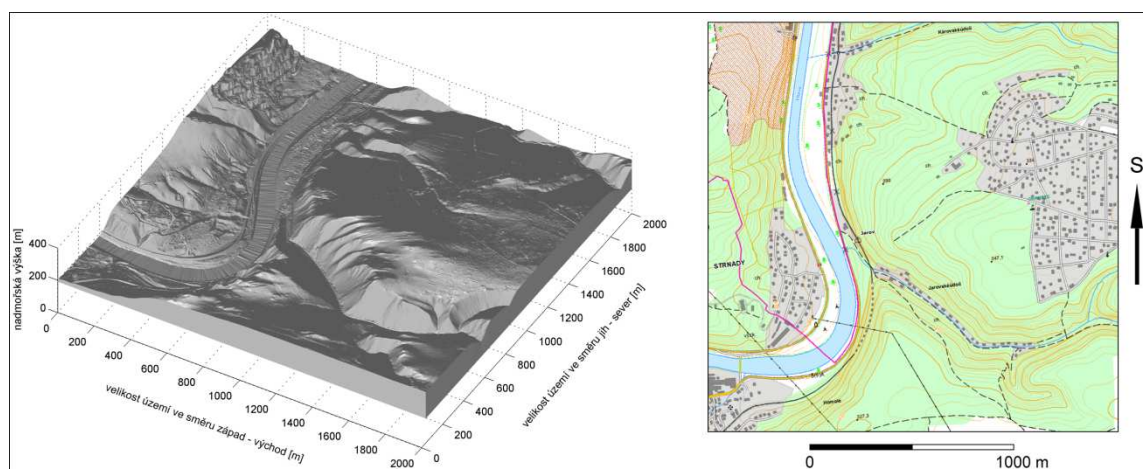
5.1.1 Lokalita Ohrobec

Území se nachází v okolí obce Ohrobec a významně do něj zasahuje také správní oblast obce Dolní Břežany a Praha. Přesněji lze jeho polohu vymezit čtvercovou hranicí se zeměpisnými souřadnicemi levého horního rohu $49^{\circ}57'24,5''$ s. š. a $14^{\circ}23'11,3''$ v. d. Pravý dolní roh čtverce

se promítne do bodu se souřadnicemi $49^{\circ}56'19,7''$ s. š. a $14^{\circ}24'53,4''$ v. d. Z přiloženého blokdiagramu i topografického schématu (Obr. 8) je patrné, že terén je poměrně členitý. To ostatně dokládá také rozdíl nadmořské výšky mezi nejvýše a nejnižše položeným bodem, jež činí 162 m. Střední nadmořská výška v oblasti je 275 m n. m. Z geomorfologického hlediska se jedná o poměrně zajímavé území, neboť se nachází na rozhraní dvou geomorfologických celků. Hranici zde představuje řeka Vltava, jejíž levý břeh spadá do celku Brdská oblast, zatímco pravý břeh náleží nejjihnějšímu cípu Pražské plošiny (CENIA, c2010-2011).

Charakteristický tvar terénu je utvářen především třemi prvky. V první řadě je to říční síť lemovaná hluboce zaříznutými údolími typu „V“. Výjimku, zde tvoří pouze Vltava představující tepnu říčního systému, jejíž údolí má podstatně plošší a širší dno. Druhý typ terénu představuje mírně zvlněná plošina, rozkládající se v severozápadní části oblasti. Poslední morfologickou dominantou je kamenolom, který zaujímá severní část levého břehu Vltavy a v území reprezentuje antropologicky přeměněný terén.

Při detekci linií terénní kostry by v tomto území měly být odhaleny zejména údolnice jednotlivých přítoků Vltavy a některé ostré hrany, nacházející se na rozhraních mezi svahy údolí a přilehlou plošinou. Výrazně by se měly projevit člověkem vytvořené hrany v prostoru lomu a minimálně v případě levého břehu Vltavy, kde terén prudce přechází do říčního koryta, by měla být detekována také břehová čára řeky.



Obr. 8 Lokalita Ohrobec. Blokdiagram terénu (vlevo) a topografické schéma (vpravo)

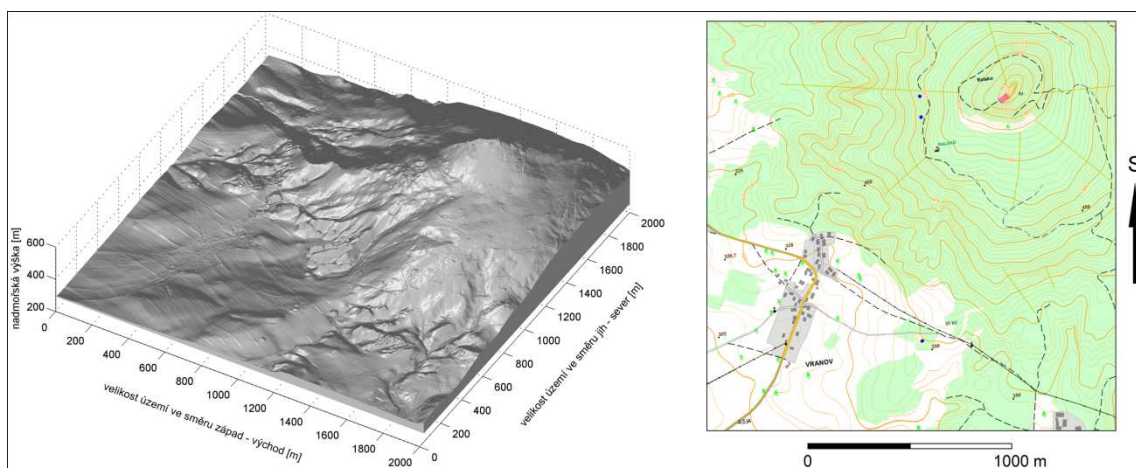
(zdroj 1: vlastní; zdroj 2: Cenia, c2010-2011)

5.1.2 Lokalita Ralsko

Data z lokality Ralsko pokrývají stejnojmenný vrchol a jeho především jihozápadní okolí. Z větších sídel se nejblíže nachází obec Mimoň v okrese Česká Lípa, pod jejíž správou také část území spadá. Kromě Mimoně do oblasti zasahují správní území obcí Ralsko a Noviny pod Ralskem. Geograficky lze lokalitu vymezit rovnoběžkami se zeměpisnými šířkami $50^{\circ}40'39,5''$ s. š. a $50^{\circ}39'34,2''$ s. š. Ve směru západ – východ je lokalita ohraničena poledníky, které odpovídají zeměpisným délkám $14^{\circ}44'42,6''$ v. d. a $14^{\circ}46'25,4''$ v. d. Oblast je vertikálně silně

členitá a náleží jí nevyšší hodnota převýšení mezi nejvyšším a nejnižším bodem, které činí 407 m. Střední nadmořská výška terénu je 402 m n. m a jeho průběh opět ilustruje příslušný blokdiagram a topografické schéma (Obr. 9). Celá lokalita spadá do jediného geomorfologického celku a tím je Ralská pahorkatina.

Z morfologického pohledu jsou významné zejména dva základní tvary, kterými jsou samotný vrch Ralsko a téměř rovinné území v okolí vsi Vranov. Svahy Ralska jsou narušeny četnými projevy vodní eroze, která zde vytváří systém drobných údolí, odtokových rýh, zářezů a hřbetů. Především odhalení průběhu těchto tvarů by mělo být výsledkem detekce hran v této oblasti. Dále by měly být nalezeny průběhy hlavních hřbetů vrchu Ralsko. Výrazný je především hřbet, směřující od vrcholu západním směrem. Podrobnost, s jakou bude terén analyzován, bude záviset na nastavení algoritmu. Při podrobné detekci lze očekávat také odhalení nejvýraznějších hran v ploché části území.



Obr. 9 Lokalita Ralsko. Blokdiagram terénu (vlevo) a topografické schéma (vpravo)

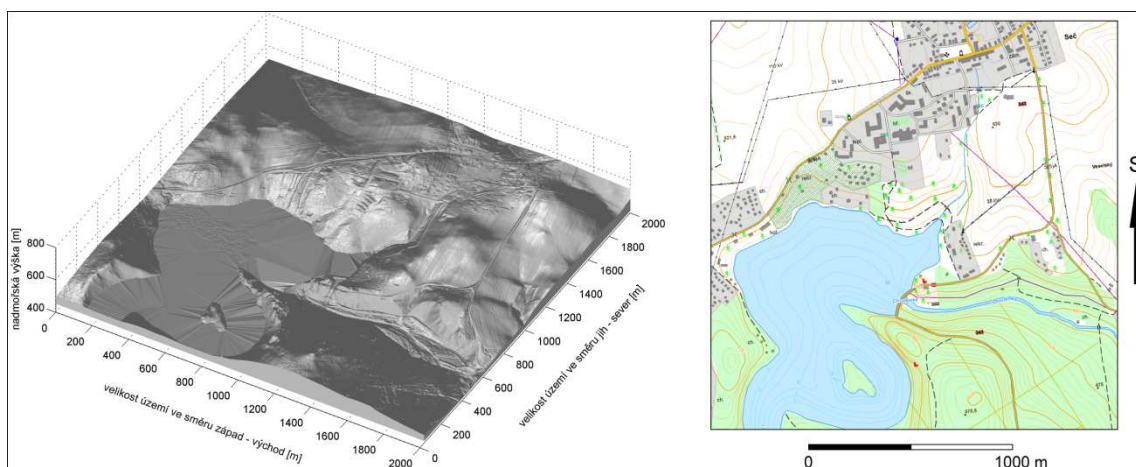
(zdroj 1: vlastní; zdroj 2: Cenía, c2010-2011)

5.1.3 Lokalita Seč

Lokalita se rozkládá v okolí přehradní hráze Sečské vodní nádrže ležící na řece Chrudimce. Za svůj název přehrada vděčí stejnojmenné obci, která se nachází v její bezprostřední blízkosti. Seč leží v okrese města Chrudim, od kterého je vzdálena přibližně 15 km jihovýchodním směrem. Polohu lokality lze stejně jako v předchozích případech popsat také zeměpisnými souřadnicemi. Levý horní roh odpovídajícího čtverce má souřadnice 49°50'55,4" s. š. a 15°38'23" v. d. Pravý dolní roh pak 49°49'49,568" s. š. a 15°40'3,1" v. d. Střední nadmořská výška terénu je 507 m n. Prestože se mezi ostatními lokalitami jedná o nejvýše položenou oblast, členitost území není nijak extrémní a převýšení mezi naměřeným minimem a maximem nadmořské výšky zde činí 126 m. V systému geomorfologického členění Česka je celé území součástí jediného celku a tím jsou Železné hory.

Pro účely testování algoritmů detekujících terénní hrany je zajímavý zejména ostrý přechod mezi hladinou vodní nádrže a okolními svahy. Poměrně výrazně se v blokdiagramu (Obr.

10 vlevo) projevuje i údolí potoka přitékajícího do nádrže v její severovýchodní části. Specifický tvar získává terén také pod hrází, kde se řeka hluboce zařezává. Zde by měl být určitě odhalen minimálně průběh údolnice.



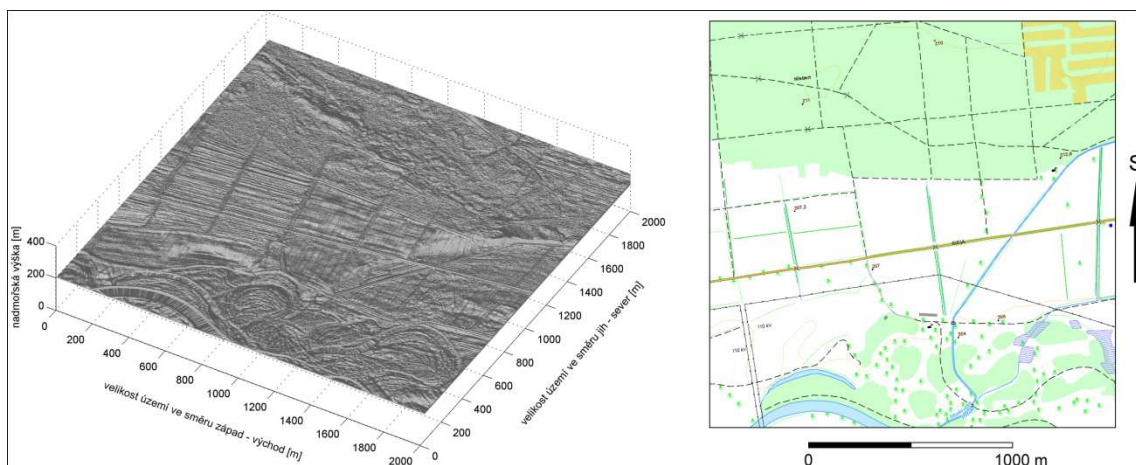
Obr. 10 Lokalita Seč. Blokdigram terénu (vlevo) a topografické schéma (vpravo)

(zdroj 1: vlastní; zdroj 2: Cenia, c2010-2011)

5.1.4 Lokalita Kladruby

Lokalita se rozkládá na pravém břehu řeky Labe mezi obcemi Kladruby nad Labem a Selmice. Nejvýznamnějším městem v okolí jsou Pardubice, do jehož okresu celé území spadá. Západním směrem leží nejbližší město Přelouč a zhruba ve stejné vzdálenosti jako Pardubice také Kolín. Rovnoběžkami ohraničujícími tuto oblast jsou $50^{\circ}3'55,8''$ s. š. a $50^{\circ}2'50''$ s. š. Západním směrem lokalita sahá k poledníku $15^{\circ}26'49,146''$ v. d. Východní okraj koresponduje s poledníkem $15^{\circ}28'30''$ v. d. Výšková členitost celého území je velmi nízká a maximální rozdíl nadmořských výšek mezi dvěma body dosahuje pouhých 13 m. V oblasti labské nížiny pak nepřekvapí ani nízká hodnota střední nadmořské výšky, která činí 207 m. n. m. Geomorfologicky je lokalita součástí celku Východolabská tabule.

V případě této lokality je otázkou, jaké tvary zemského terénu by měly být detekcí hran vlastně odhaleny. Vzhledem k velmi přesným laserovým datům se mohou některé ostré přechody objevit v místech mrtvých ramen a odškracených meandrů podél toku Labe. Při velmi přesné detekci by mohly být nalezeny také hrany, lemující silnici procházející územím od východu k západu. A je zde jistá šance na odhalení koryta potoka přitékajícího do Labe.



Obr. 11 Lokalita Kladruhy. *Blokdiagram terénu (vlevo) a topografické schéma (vpravo)*
(zdroj 1: vlastní; zdroj 2: Cenia, c2010-2011)

5.1.5 Převod dat na rastr

Data byla od ČÚZK získána ve formátu XYZ, který představuje standardně využívaný formát TXT s pevně stanovenou vnitřní strukturou zpracovaný v souladu se znakovou sadou ASCII. Prostorové souřadnice popisující polohu bodů byly zaznamenány ve třech sloupcích oddělených mezerami. První dva sloupce představovaly souřadnice bodu v souřadnicovém systému WGS 84 / UTM zone 33N, ve třetím sloupci byla uvedena nadmořská výška ve výškovém systému Balt – po vyrovnání. Každý bod byl v souboru představován jedním řádkem a kromě lokality Seč byla všechna testovací území pokryta více než čtyřmi miliony body. V případě Seče byla průměrná hustota pokrytí nižší a celkový počet zaměřených bodů činil přibližně 3,34 milionu. U všech lokalit se jednalo o data, z nichž byly odfiltrovány neterénní body (budovy, vegetace, ...).

Pro transformaci dat na rastr byl zvolen software ArcGIS Desktop 9.3, který umožňuje přímé zpracování formátu XYZ. V prvním kroku byl proveden import dat za pomoci funkce *ASCII 3D To Feature Class*, jež je součástí programové nadstavby *3D Analyst* určené pro práci s prostorovými daty. Funkce z předaných souřadnic generuje soubory ve vektorovém formátu SHP, jejichž obsahem mohou být samostatné body (*Point*), skupiny bodů (*Multipoint*), polylinie (*Polylines*) nebo polygony (*Polygons*). Pro tuto práci přicházely v úvahu varianty *Point* a *Multipoint*. *Point* je vhodný v situacích, kdy se předpokládá, že bodům budou přiřazovány další popisné atributy. To zde neplatilo, a proto byl upřednostněn způsob uložení *Multipoint*, který je navíc optimalizován pro zpracování velkého množství dat (ESRI, c2011). Při zadávání vstupních parametrů byl ještě definován odpovídající souřadnicový a výškový systém. Zbývajícím parametrům byly ponechány softwarem navržené hodnoty, které zároveň odpovídaly momentálním požadavkům. Výsledkem této části byly čtyři vektorové datové soubory obsahující body. Jedinou informací, kterou každý bod nesl, byla informace o jeho poloze v prostoru.

Převod vektorové bodové reprezentace na rastr byl realizován ve dvou krocích. Nejprve byl zkonstruován TIN a ten byl následně transformován do podoby rastru (více kap. 2.3.1). Při

vytváření TIN byla aplikována další funkce z nabídky *3D Analyst*, funkce *Create TIN From Features*. Pokud jsou vstupními daty body uložené způsobem *Multipoint*, nenabízí tato funkce žádné zásadní volitelné parametry. Z obdržného TIN byl v poslední fázi vygenerován rastr, k čemuž posloužila funkce *TIN to Raster*, jež se opět řadí k funkcím z *3D Analyst*. Zde bylo velmi důležité zvolit vhodné prostorové rozlišení výsledného rastru. Jednak bylo třeba vytvořit dostatečně přesný rastr, jenž by korektně zachycoval průběh skutečného terénu. Zároveň však bylo nezbytné udržet velikost rastru v únosných mezích, aby s ním bylo možné nadále pracovat v uživatelsky přijatelném čase. Jako kompromis byla zvolena velikost pixelu 1 m, která se navíc jevila jako vhodná i vzhledem k hustotě zaměřených bodů (průměrná hustota bodů se pohybovala okolo 1 bodu / m²). Pro určení výškové hodnoty pixelu byla vybrána metoda lineární interpolace (*Linear*) nad trojúhelníky v TIN (viz kap. 2.3.1), která minimalizuje shlazování terénu, jež vede k nežádoucímu potlačení terénních hran. Důležitá byla také volba datového typu, v němž budou nadmořské výšky v rastru popisovány. Na tomto místě byla zvolena reálná čísla (*Float*), která jsou pro zaznamenávání velmi přesných hodnot vhodná.

V závěru byly čtyři nově vytvořené výškopisné rastry exportovány, jako jednokanálová (šedotónová) obrazová data ve formátu TIFF s barevnou hloubkou 32 bitů. Formát TIFF byl upřednostněn zejména pro jeho plnou podporu softwarem Matlab, s nímž bylo nadále pracováno.

5.2 Základní princip

V geoinformatice je průběh terénu vyjadřován prostřednictvím digitálních modelů, které využívají nejrůznější datové modely. Mezi nejčastěji využívané patří vektorové modely znázorňující terén pomocí výškopisných bodů či linií představujících vrstevnice, modely TIN postavené na principech triangulace a rastrové modely s pravidelnou strukturou pixelů, jejichž hodnota popisuje nadmořskou výšku v daném území. Společným rysem všech těchto modelů je, že se snaží popsat terén jako plochu, která v prostoru mění svůj tvar.

Kromě toho existuje ještě jiný způsob, jakým lze popsat průběh terénu, a tím je příčný profil. Ten představuje pomyslný řez terénem v předem stanoveném směru a vyjadřuje nadmořskou výšku terénu v jednotlivých bodech, kterými prochází. Zatímco výše uvedené modely terénu prezentovaly nadmořskou výšku v určitém bodě jako funkci dvou proměnných (poloha bodu ve směru osy x a y), v případě příčného profilu vystačíme pouze s funkcí jedné proměnné (vzdálenost od počátku profilu). Daní za toto zjednodušení je zásadní ztráta informace o skutečném tvaru terénu v daném místě, neboť profil dokáže zachytit jeho podobu pouze v jediném směru. Tento nedostatek lze zmírnit vytvořením více profilů procházejících jedním bodem, které jsou vedeny v různých směrech. V takovém případě je navíc vhodné, aby byly směry jednotlivých profilů co možná nejrozdílnější. Vzájemná pozice dvou profilů je ideální, pokud jsou na sebe směry těchto profilů kolmé, směry tří profilů by mezi sebou měly svírat úhel 60 stupňů atd.

Analýza terénu prováděná skrze příčné profily je základním kamenem obou algoritmů, které byly v rámci této práce navrženy a testovány. Jako vhodný se tento způsob jeví i v souvislosti se způsobem uložení vstupních dat. Rastr lze totiž, díky jeho pravidelné struktuře, velice snadno rozložit na sérii příčných profilů vedených ve čtyřech základních směrech (podél řádků, sloupců a obou diagonál). Postupnou analýzou všech příčných profilů, je možné realizovat detekci terénních hran v celém testovacím území a zpracování ve čtyřech směrech poskytne dostatečné množství informací o tvaru terénu v každém pixelu.

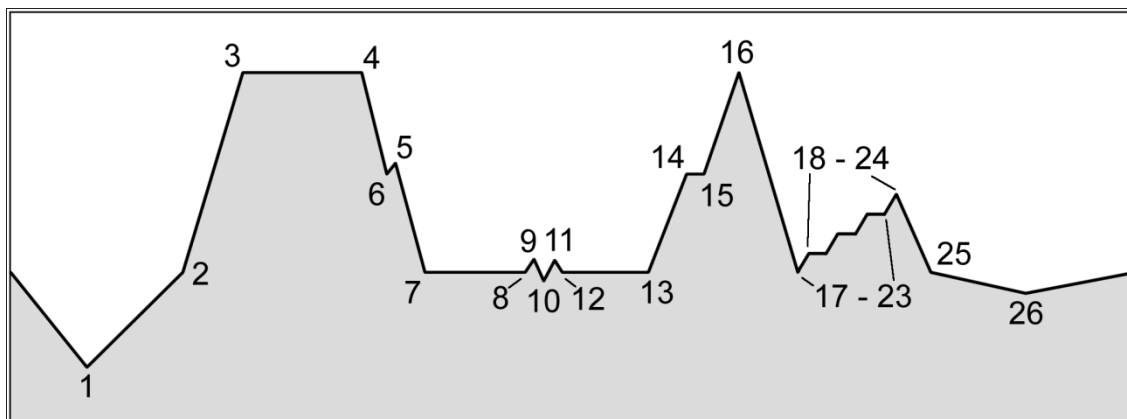
5.3 Specifické rysy detekce linií terénní kostry na základě analýzy příčných profilů

Hledání hran v datech znázorňujících terén představuje značně složitý úkol. Aby jej bylo možné řešit, je nutné si nejprve uvědomit, jakých tvarů může terén nabývat, a stanovit, na základě jakých kritérií bude posuzováno, které data představují linie terénní kostry a která nikoli. Níže jsou uvedeny základní otázky, na něž bylo nezbytné předem odpovědět, a popsány některá kritická místa, která bylo třeba při vývoji algoritmu pro detekci linií terénní kostry ošetřit.

5.3.1 Úhel svahů tvořících hranu, převýšení hrany oproti okolnímu terénu a délka svahů ve směru příčného profilu

V souladu s definicemi shrnutými v kapitole 3 lze tvrdit, že každá terénní hrana je tvořena dvěma svahy, které mají různý sklon, různou expozici, popřípadě splňují obě tyto podmínky. Takové tvrzení sice není jednoznačné, přičemž jako problematické se jeví např. situace, kdy terén pozvolna mění svoji křivost, a přesto je hodnocen jako hrana. Pro následující popis je však zcela postačující a problematice plynulé změny křivosti bude věnováno více prostoru v kapitole 5.3.2.

Na Obr. 12 Obr. 12 je znázorněn modelový příčný profil, ve kterém je zachyceno 26 míst, v nichž se nachází terénní hrana. Jak je na první pohled zřejmé, některé hrany ovlivňují výsledný tvar profilu velmi výrazně, zatímco jiné hrany se téměř neprojeví. Jako příklady z reálného terénu lze na jedné straně uvést údolnice hlubokých údolí či hřbetnice horských pásem, na straně druhé pak např. železniční násypy, hráze rybníků, okraje strání, ale také strouhy podél komunikací či erozní zářezy drobných toků. Existence takto různorodého spektra hran, z hlediska jejich významu na celkový ráz terénu, je pro data pořízená laserovým skenováním typická a je důsledkem jejich vysoké přesnosti. Kromě toho se v datech projevuje také celá řada nepravých hran, které jsou výsledkem šumu nebo se objevují v místech, kde byla prováděna filtrace a v terénu zůstaly relikt budov, vegetace a dalších objektů.



Obr. 12 Různě významné terénní hrany zachycené v příčném profilu – modelový příklad

O tom, které hrany by měly být detekcí odhaleny a které naopak zanedbány rozhoduje účel, za jakým je detekce prováděna. Jedná se v podstatě o míru podrobnosti, s jakou je terén analyzován a je žádoucí, aby algoritmus, který analýzu provádí, umožňoval tuto míru měnit dle aktuálních potřeb. Základní otázka přitom zní, jaké parametry terénu při detekci porovnávat, aby bylo možné korektně rozhodnout, zda nalezená hrana je či není významná.

Jedním z parametrů popisujících terénní hranu, je úhel, který svírají svahy, jež hranu tvoří. Lze předpokládat, že čím bude tento úhel ostřejší, tím výrazněji se hrana v terénu projeví a naopak. Typické příklady výrazných hran z hlediska úhlu jsou v modelovém profilu označeny číslicemi 1, 3, 13 a 16. Na druhou stranu hranami, které se projevují pouze slabě, jsou případy 2 a 26. Druhým důležitým ukazatelem vypovídajícím o významu hrany je její převýšení oproti okolnímu terénu. Stanovit optimální velikost tohoto okolí je značně problematické, neboť je přitom nezbytné zohlednit konkrétní podobu terénu v místě každé hrany a ta se může v různých částech profilu dosti zásadně lišit. Částečným východiskem je sledovat převýšení mezi hodnocenou hranou a dvěma sousedícími hranami. Toto řešení však přináší jistá úskalí, která budou popsána dále. Při posuzování převýšení přitom stačí, aby se jako dostatečně převýšený projevil aspoň jeden ze svahů, který hranu tvoří. Takový případ demonstruje např. hrana 3, kde potřebného převýšení dosahuje pouze levý svah, zatímco pravý svah je tvořen rovinou. Třetí parametr, kterého lze při detekci hran využít, je délka svahů ve směru příčného profilu. V ideálním případě platí, že s rostoucí délkou svahů se hrana, kterou svahy tvoří, projevuje v terénu výrazněji. Při zkracování délky svahů je tomu přesně opačně. Zde již nevystačíme pouze se sledováním jednoho svahu, ale je třeba zaměřit se na oba. Za příklad hran s dostatečnou délkou svahů poslouží opět hrana 3 a také třeba případy 1 nebo 7.

Pro jednoznačné vyhodnocení hrany je přitom nezbytné zohlednit všechny tři parametry zároveň. Vhodným nastavením jejich prahových hodnot lze v průběhu detekce zanedbat hrany, které nejsou pro požadovanou míru podrobnosti významné. V modelovém profilu na obr. 12 by to mohly být např. hrany 5, 9 nebo 11. Jejich svahy sice svírají dostatečně ostrý úhel, ale hodnota převýšení ani minimální délky svahů zde splněny nejsou. Dalším příkladem jsou hrany 2 a 26, kde se jako kritický jeví příliš tupý úhel mezi svahy, které hrany vytváří. V případě

hrany 26 je navíc také relativně malé převýšení. A nakonec by byly potlačeny kupříkladu i hrany 8, 14, 17, 23 a další, z důvodu nedostatečné délky jednoho ze svahů.

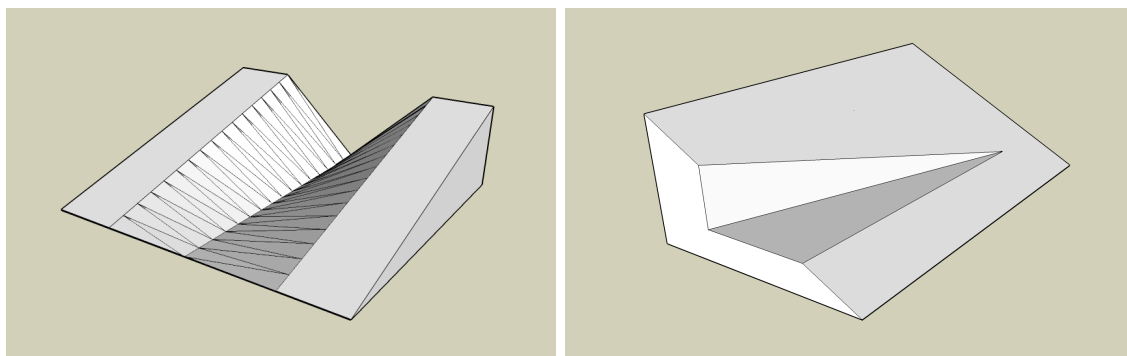
Správnost hodnocení hran tímto způsobem bohužel trpí několika nedostatky. K hrubým chybám by došlo při vyhodnocování hran 17 a 24, kde by jeden ze svahů nesplňoval požadavek na jeho minimální délku. Hrany by takto byly považovány za nevýznamné, což nelze akceptovat, neboť již při letném pohledu na modelový profil je zřejmé, že se na charakteristickém tvaru terénu podílejí velmi výrazně. Tento defekt je způsobem drobnými terénními tvary nacházejícími se při okrajích svahů tvořících důležitou terénní hranu. Při analýze profilu je významná hrana skryta mezi zcela zanedbatelnými hranami vznikajícími na drobných tvarech a její správná detekce se zesložituje. Kromě nepatrných terénních tvarů způsobuje obdobné problémy také šum. V reálných datech jsou takové případy poměrně časté a je tedy žádoucí jejich patřičné ošetření.

5.3.2 Plynulé změny tvaru terénu

Průběh reálného terénu může být silně proměnlivý, což se projeví také na hodnotách parametrů popisujících terénní hrany v předchozí kapitole. Skutečnost, že tyto parametry nabývají v různých částech jedné hrany různých hodnot, dále ztěžuje proces detekce a přináší řadu specifik, jež je nezbytné zohlednit během interpretace obdržенých výsledků. V možnostech tohoto textu rozhodně není popsát všechny případy, kterým je při detekci hran potřeba věnovat zvýšenou pozornost. Proto se soustředí pouze na ty situace, které si lze snadno představit a které zároveň vhodně ilustrují prezentovanou problematiku.

Typickým příkladem změny úhlu mezi svahy tvořícími hranu, představují plynule se rozevírající údolí (Obr. 13 vlevo). Zatímco v horních částech vodních toků, jsou údolí často hluboce zaříznutá a úhel, který svírají jejich svahy je velmi ostrý, ve středních a spodních částech toků se údolí obvykle otevírá a úhel rapidně roste. Tato změna úhlu může probíhat velice pozvolně a může vést až k situaci, kdy oba svahy představují téměř rovinu (typicky nížinné oblasti). S ohledem na zvolenou prahovou hodnotu úhlu pak musí dojít k situaci, kdy pixely představující údolnici, od určitého místa již nebudou považovány za významnou terénní hranu. Pokud by svahy navíc opravdu přecházely v rovinu, nebyla by nadále zřejmě splněna ani podmínka minimálního převýšení. Z pohledu detekce terénních hran je takovýto výsledek správný, neboť část údolnice ve zmiňovaném případě opravdu nepředstavuje důležitou terénní hranu. Výsledek však nelze interpretovat tak, že údolí v místě, kde již není údolnice detekována končí či přímo náhle přechází v rovinu. Podobně opatrně je třeba přistupovat k interpretaci výsledků detekce terénních hran jako linií představujících vodní toky. Ty samozřejmě v místě rozevření údolí nemizí a ztotožňovat je s detekovanou linií by v takovém případě bylo chybné. Zde je patrné, že výsledky detekce je vždy nezbytné hodnotit s ohledem na stanovené prahové hodnoty. Kromě toho je z výše uvedeného zřejmý rozdíl mezi algoritmy zaměřenými na detekci hran a linií terénní kostry a algoritmy řešícími odtokové poměry. Míst, kde v terénu dochází ke

změnám v úhlu svahů tvořících hranu je mnoho a rozhodně se nejedná pouze o údolí. Stejně se mohou projevat také hřbetnice a všechny ostatní terénní hrany.

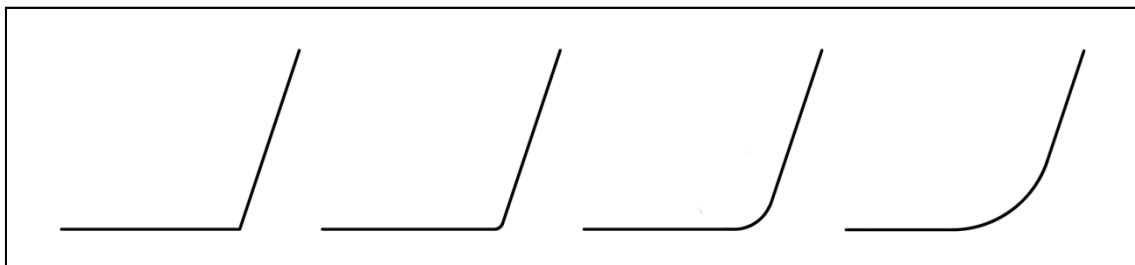


Obr. 13 *Plynule se rozvírající údolí (vlevo) a postupně zanikající terénní terasa (vpravo).*

Zatímco změny v úhlu jsou důsledkem proměnlivého tvaru terénu, změna délky svahu ve směru profilu explicitně vyjadřuje změnu rozměrů terénních tvarů. Jedním příkladem z této kategorie mohou být např. terénní terasy, jejichž okrajové hrany se postupně sbíhají, až terasa zcela zmizí (Obr. 13 vpravo). Úhel, který svahy tvořící terasu svírají, je stále stejný, zatímco se plynule mění hodnota délky svahu i převýšení příslušných hran. Také v tomto případě je třeba přistupovat k interpretaci výsledků opatrně. Pokud by měly být odhaleny hrany vymezující terénní terasu na Obr. 13 v celé jejich délce, musela by být prahová hodnota vyjadřující minimální délku svahu rovna nule. V takovém případě, by však v jiných částech terénu došlo např. k nežádoucí detekci hran způsobených šumem. Je tedy třeba zadat hodnotu vyšší, která by detekci šumu eliminovala. Tento krok však zároveň způsobí, že z hran tvořících terasu budou detekovány pouze jejich části. Z pohledu detekce je tento výsledek opět správný, pro interpretaci člověkem však může být poněkud zavádějící.

V popisovaných příkladech byly uvedeny pouze případy, kdy se terénní hrany ve výsledcích ztrácely. Na základě stejných principů se však hrany ve výsledcích také objevují. Kromě toho dochází u některých hran k situacím, kdy se jejich parametry mění opakovaně. Pokud budou hodnoty parametrů v těchto opakováních kolísat okolo prahových hodnot, projeví se toto ve výsledku přerušovaným průběhem nalezených hran. Zde je třeba také dodat, že jednotlivé změny parametrů se vzájemně ovlivňují. To znamená, že např. se změnou úhlu svahů se může měnit také jejich délka či převýšení hran. Proto zde také nebylo věnováno více prostoru změnám v převýšení hran, neboť k těm dochází v obou předložených příkladech.

Jinou vlastností terénu, která popisuje jeho průběh, a které doposud nebylo věnováno příliš pozornosti je jeho křivost. Na analýze maximální a minimální lokální křivosti je postavena řada algoritmů popisovaných v kapitole 4. Výpočet křivosti funkce jedné proměnné by bylo možné využít i pro detekci terénních hran založenou na zpracování příčných profilů. Tento způsob však nebyl zařazen do náplně této práce a nebude mu proto věnováno více prostoru. Přesto je velmi důležité na tomto místě křivost uvést. Popisuje totiž, jak razantně se mění sklon terénu, což má velký význam při rozhodování o tom, jaké tvary terénu hranu tvoří a jaké nikoli.



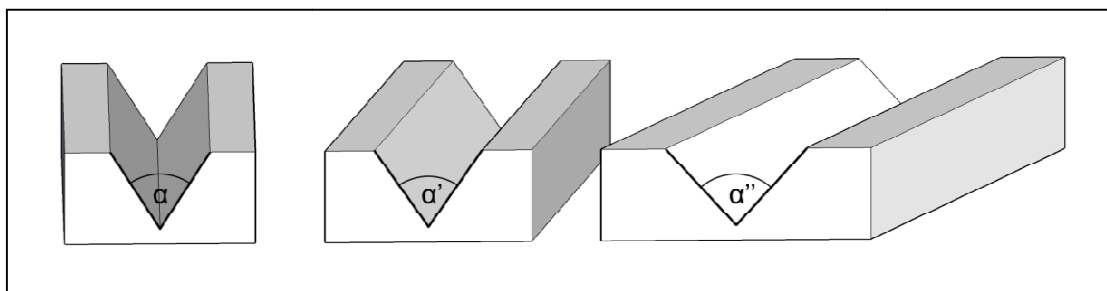
Obr. 14 Přechody mezi dvěma různě skloněnými svahy

Na obrázku Obr. 14 jsou v profilech zachyceny čtyři různé přechody terénu mezi dvěma různě skloněnými svahy. Zcela vlevo je znázorněn ostrý přechod, který, v případě, že bychom profil terénu prezentovali jako funkci, odpovídá bodu, v němž tato funkce nemá derivaci. Směrem doprava následují ukázky plynulých přechodů, u kterých maximální hodnota křivosti postupně klesá. V takových případech se nabízí otázka, do jaké míry lze stále hovořit o hranách a pokud ano, jak na tyto hrany nahlížet v procesu detekce. Algoritmy, které byly v rámci této práce sestrojeny, řeší tento problém různými způsoby, jež jsou uvedeny vždy společně s popisem algoritmu.

5.3.3 Směr průběhu terénních hran

Již v kapitole 5.2 bylo konstatováno, že informace, získaná o tvaru terénu v určitém bodě metodou příčných profilů, je tím komplexnější, čím více profilů v různých směrech je v tomto bodě sestrojeno. V případě rastrových dat je nejvhodnější vést profily ve čtyřech základních směrech, které odpovídají směřům řádků, sloupců a obou hlavních diagonál. Pro detekci linií terénní kostry je velmi důležité pochopit, jaký je vztah mezi skutečnou podobou terénních tvarů a jejich vyobrazením v profilech, které jsou těmito tvary vedeny v různých směrech. Následující popis bude zaměřen především na údolí. Uvedená tvrzení lze však vztáhnout i na ostatní terénní tvary. V kapitole 5.3.1 byly shrnuty základní parametry, jimiž lze popsat terénní hrany zachycené v příčných profilech, a pomocí jejichž hodnot jsme schopni rozhodnout, zda se jedná o hrany významné či nevýznamné. Obecně však platí, že hodnoty parametrů jsou pro další rozhodování relevantní pouze tehdy, je-li profil veden kolmo na průběh terénního tvaru, na němž hrany vznikají. V případě údolí budou hodnoty jednotlivých parametrů nejspíše popisovat jeho skutečný tvar, pokud bude profil veden napříč tímto údolím. Bude-li profil orientován jinak, bude v profilu údolí taktéž zachyceno, jeho tvar však již nebude pro hodnocení hran vypovídající. Typickým projevem je postupné zvětšování úhlu svíraného mezi svahy údolí a prodlužování jeho svahů. Extrémním případem je situace, kdy je směr profilu totožný se směrem údolí. V profilu se pak zobrazí pouze jediná linie odpovídající výškovému průběhu údolnice. Samotnou údolnici však v takovém profilu nejsme schopni detekovat jako hranu. Změnu parametrů údolí v různě orientovaných profilech zachycuje Obr. 15. Na příkladu zcela vpravo je řez terénem veden ve směru kolmém na směr údolí a úhel, jež svírají svahy údolí zachycené v profilu je, roven 60° . Prostřední ukázka zachycuje řez údolím ve směru $67,5^\circ$. Již zde je patrné postupné zvětšování úhlu mezi svahy, jehož hodnota je v tomto případě 64° .

Příklad nejvíce vpravo ilustruje profil vedený ve směru odpovídajícím natočení od směru údolí o 45° . Svahy stále stejného údolí budou v tomto profilu svírat úhel $78,5^\circ$. Kromě nárůstu úhlu, dochází i prodlužování svahů.



Obr. 15 Příčné profily vedené ve směrech 90° , $67,5^\circ$ a 45° na směr údolí

Při zpracování dat v rastrové podobě, lze najít čtyři kritické směry, v nichž bude detekce nejvíce zkreslována. Pokud pro následující popis využijeme polární soustavu souřadnic s počátkem umístěným v pixelu, jímž jsou profily vedeny, a hlavní osou odpovídající řádce, ve kterém se pixel nachází, lze tvrdit, že čtyři základní směry, v nichž je rastr zpracováván, odpovídají úhlům 0° , 45° , 90° a 135° . Kritické směry pro detekci terénních hran pak odpovídají osám těchto úhlů. Číselně vyjádřeno tyto směry odpovídají úhlům $22,5^\circ$, $67,5^\circ$, $112,5^\circ$ a $157,5^\circ$. Pokud například údolí probíhá v některém z těchto směrů, bude jeho význam posuzován podle nejvíce zkreslených hodnot parametrů. Naopak pro údolí vedoucí v některém ze základních směrů bude vždy existovat profil procházející napříč tímto údolím a vyhodnocování údolí v tomto profilu bude zcela korektní.

5.4 Navržené algoritmy pro detekci terénních hran

Vývoj algoritmu pro detekci linií terénní kostry představoval dlouhodobý proces, při kterém byla testována řada rozdílných přístupů. V této kapitole jsou představeny dva, které poskytovaly nejpříjemnější výsledky. Zatímco první je popsán spíše principiálně, druhému přístupu, který lze považovat za hlavní výstup z praktické části této práce, je věnováno více pozornosti.

Oba algoritmy byly navrženy tak, aby byly schopny zohlednit jednu ze základních vlastností dat pořízených leteckým laserovým skenováním, kterou je jejich vysoká přesnost. Primárním cílem tak bylo zajistit, aby měl uživatel možnost volit, s jakou mírou podrobnosti má být terén analyzován a jak významné hrany mají být detekovány. Realizace tohoto požadavku je u obou algoritmů založena na řízeném vyhlazování průběhu příčných profilů znázorňujících terén. Při vyhlazování je původní profil nahrazován zjednodušeným profilem, který zachovává pouze významné tvarové rysy původního profilu a ty nepodstatné eliminuje. Pixely představující drobné terénní tvary a šum, na jejichž základě se v původním profilu objevovaly bezvýznamné hrany, jsou v novém profilu odstraněny a nahrazeny vyhlazeným terénem, který zohledňuje tvarový trend terénu v dané oblasti. Proces vyhlazování je plně řízen uživatelem, který určuje

stupeň vyhlazení a tím podrobnost prováděné detekce. V následujícím textu jsou představeny dva algoritmy představující rozdílné způsoby vyhlazení terénu.

5.4.1 Analýza parametrů terénních tvarů

Vyhlazování terénu touto cestou spočívá v analýze parametrů terénních tvarů popsaných v kapitole 5.3.1 a jejich porovnávání s prahovými hodnotami zvolenými uživatelem. Hned v úvodu je třeba uvést, že tento postup je možné aplikovat pouze pro hledání určitých typů hran. Těmi jsou zejména hrany typu hřbetnice a údolnice, a kromě toho algoritmus odhalí také hrany na rozhraních rovinných ploch a svahů. Detekce však není schopna odhalit např. hrany vznikající na styku dvou svahů s různým sklonem ale stejnou expozicí.

V první fázi zpracování jsou všechny pixely v profilu klasifikovány jako pixely představující rovinu, svah či některou z výše uvedených hran. Rozčlenění pixelů vychází z jednoduchého testování nadmořských výšek mezi třemi sousedícími pixely. Jsou-li rozdíly nadmořských výšek mezi pixely minimální (tolerance zadána uživatelem), je prostřední pixel označen jako pixel v rovině. Pokud leží první a třetí pixel výše než pixel druhý, je tento považován za údolnici. V opačném případě se jedná o hřbetnici. Aby byl prostřední pixel vyhodnocen jako pixel svahu, musí se jeden z jeho sousedů nacházet ve vyšší nadmořské výšce a zároveň druhý ve výšce nižší. V tomto kroku jsou odhaleny veškeré hrany a svahy, nevylučuje ty nepodstatné nebo tvořené šumem. Dále je pro každou nalezenou hranu testováno, zda svahy, které ji tvoří, splňují kritéria pro to, aby mohla být označena jako významná. Tato kritéria vycházejí z prahových hodnot jednotlivých parametrů, které předem definoval uživatel. Na základě takovéto analýzy, je zřejmé které hrany mají být zachovány v původní podobě a které naopak vyhlazeny.

Samotné vyhlazení probíhá tak, že pro každou nevýznamnou hranu jsou nalezeny nejbližší sousední hrany a mezi pixely, které těmto hranám odpovídají, je provedena lineární interpolace. Takto všechny pixely, které předtím tvořily dva svahy a onu nevýznamnou hranu získaly nové hodnoty nadmořské výšky a je nezbytné znovu provést testování, zda představují svah či rovinu (údolnice ani hřbetnice se mezi interpolovanými pixely objevit nemůže). V případě, že se vedle sebe nacházelo více nevýznamných hran, může dojít k tomu, že se nově interpolovaný povrch stane například svahem některé z nich. V takovém případě je třeba proces vyhlazení opakovat, dokud v novém profilu nezůstanou zachovány pouze důležité terénní hrany. Následně je u všech pixelů v profilu určena jejich poloha v původním rastru (obrazové souřadnice) a pixelům s odpovídajícími souřadnicemi ve výsledném rastru je přiřazena buď hodnota jedna, představuje-li pixel ve vyhlazeném profilu hranu, nebo nula, pokud reprezentuje svah či rovinu.

Jak bylo již naznačeno, celý rastr je zpracováván postupně po jednotlivých příčných profilech vedených ve čtyřech základních směrech, čímž jsou nakonec obdrženy čtyři binární rastry. Z kapitoly 5.3.3 plyne, že hrany lze nejlépe detekovat v profilech vedených napříč těmito hranami. Naopak v jiných směrech se hrana projevit vůbec nemusí. V praxi to znamená, že chceme-li detekovat všechny hrany v dané oblasti (což je žádoucí), je třeba binární rastry

pořízené jednotlivých směrech vhodně zkombinovat. To lze učinit testováním polohově si odpovídajících pixelů ve všech čtyřech rastroch. Pokud pixel s obrazovými souřadnicemi i, j , nabývá aspoň v jednom rastru hodnoty jedna, bude pixel se stejnými souřadnicemi ve výsledném rastru nabývat také hodnoty jedna. Není-li tato podmínka splněna, je danému pixelu ve výsledném rastru přiřazena hodnota nula. Takto získaný výsledný binární rastr obsahuje linie zachycující veškeré terénní hrany v zájmovém území, procházející v libovolném směru.

Zde je třeba kriticky konstatovat, že výše navržený algoritmus trpí řadou nedostatků a jeho využití pro reálná data je omezené. Jeho hodnota však spočívá v tom, že odkrývá některá úskalí detekce terénních hran, která bylo možné zohlednit při vývoji druhého prezentovaného algoritmu. Největším nedostatkem je rozhodně omezení detekce na vyhledání údolnic, hřbetnic a hran vznikajících na hranici mezi rovinou a svahem. Tento nedostatek vyplývá z klasifikace pixelů v profilu na pixely představující rovinu, svah, údolnici či hřbetnici. V této fázi by bylo třeba, kromě sledování rozdílů nadmořských výšek mezi sousedními pixely, zohlednit také sklon terénu v daném pixelu, resp. zjišťovat, zda v daném pixelu nedochází k výrazné změně sklonu terénu. Pokud by tak bylo učiněno a byla by vytvořena nová třída pro klasifikaci pixelů představujících právě místo výrazné změny sklonu, lze očekávat, že by bylo detekováno další množství bezvýznamných hran. Proto by musel být náležitě rozšířen také proces vyhlazování, který by zachoval pouze pixely, v nichž dochází k zásadní změně sklonu terénu a zbytek detekovaných pixelů eliminoval. Z této úvahy vyplývá, že by musela být vyhlazena značná část příčného profilu. Tento poznatek je velmi důležitý, neboť byl využit při konstrukci dalšího algoritmu, který globálně vyhlazuje celý průběh profilu a nikoli pouze úseky, v nichž se nacházejí nevýznamné hrany. Kromě toho vyšlo při testování najevo, že lokální vyhlazování terénu může vést k takovým změnám jeho tvaru, které způsobí, že se některé hrany projevují v různě orientovaných profilech na různých místech (neodpovídají vždy stejnému pixelu ve vstupním rastru). Také tento defekt hovoří pro metodu globálního vyhlazování, která je jádrem druhého algoritmu.

Kromě výše uvedených nedostatků se objevily i další, které sice neměly tak zásadní vliv na úspěšnost detekce, jejich odstranění by však např. napomohlo rychlejšímu chodu algoritmu. Všechny tyto získané poznatky vedly k návrhu nového algoritmu, který by nedostatky tohoto původního řešení minimalizoval.

5.4.2 Aplikace principů kartografické generalizace

Vyhlazení průběhu příčného profilu, je v této části realizováno s využitím principů kartografické generalizace. K tomuto řešení bylo přistoupeno na základě analýzy nedostatků předchozího algoritmu a některých nových teoretických úvah. Základní teze se odklání od rozhodování o významnosti hrany na základě jejích parametrů a směřuje ke globálnímu vyhodnocování profilu v celém jeho rozsahu. Metoda tedy nepracuje na základě lokální analýzy terénu za účelem odhalení hran, ale nahlíží na profil jako na celek, ve kterém hledá jeho nejcharakterističtější tvarové rysy. Dalším zásadním rozdílem oproti předchozímu postupu je, že

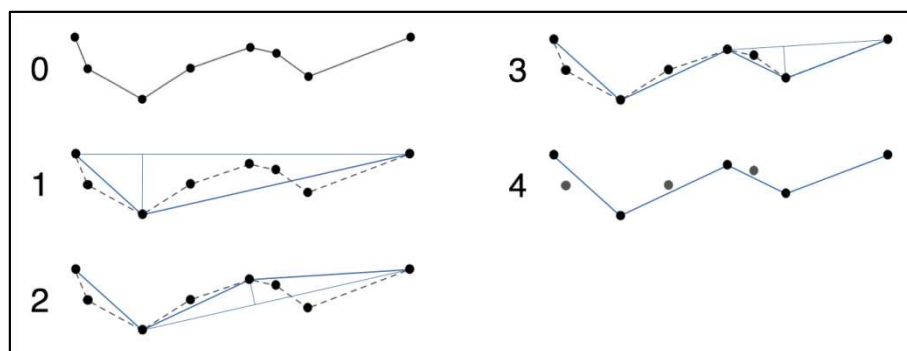
se při detekci postupuje od vyhledávání hran nejdominantnějších k těm méně výrazným, zatímco výše uvedený postup nejprve vyhledával všechny hrany bez ohledu na jejich význam a a teprve poté z nich vybíral ty důležité. Vezmeme-li v úvahu, že značné množství hran vzniká na bezvýznamných terénních tvarech nebo jako důsledek šumu, je nově prezentovaný přístup mnohem efektivnější, neboť se existencí těchto hran vůbec nezabývá (pokud tak není požadováno uživatelem).

Jak bylo již uvedeno, při vyhlazování je využíváno principů kartografické generalizace, konkrétně Douglas – Peuckerova algoritmu, který se řadí k nejrozšířenějším algoritmům využívaným v kartografických a geoinformatických softwarech pro generalizaci vektorových lomených čar. V literatuře je uváděn s přívlastkem globální, což znamená, že je generalizace prováděna s ohledem na celkový tvar lomené čáry. Díky tomu je schopen redukovat množství dat způsobem, který zachová charakteristické tvarové rysy původní linie. Míra generalizace přitom závisí zcela na rozhodnutí uživatele.

Z pohledu detekce linií terénní kostry to znamená, že díky tomuto algoritmu je možné zjednodušit průběh příčného profilu tak, aby v něm zůstaly zachovány důležité terénní hrany a naopak byly generalizací potlačeny ty, které se na typickém tvaru profilu podílejí pouze zanedbatelně. Pokud k tomu přidáme skutečnost, že míru generalizace může ovlivňovat uživatel, jedná se o ideální postup pro detekci hran prostřednictvím příčných profilů.

5.4.2.1 Douglas – Peuckerův algoritmus

Síla Douglas – Peuckerova algoritmu spočívá v jeho jednoduchosti. Při generalizování lomené čáry je nejprve nalezen její počáteční a koncový bod, které jsou spojeny úsečkou. Tato úsečka představuje výchozí nejhrubší generalizaci původní linie. V dalším kroku je vypočtena kolmá vzdálenost mezi všemi lomovými body původní čáry a touto úsečkou, a je vyhledán bod, pro který je tato vzdálenost největší. Dříve sestrojená úsečka je dále rozdělena na úsečky dvě. První vede z počátečního bodu do nalezeného nejvzdálenějšího bodu od úsečky a druhá od tohoto bodu do bodu koncového. Tímto krokem se tvar generalizované linie přiblížil tvaru původní linie. Pro další zpřesnění jejího průběhu, lze pro obě nové úsečky opět vypočítat vzdálenosti ke zbývajícím lomovým bodům a celý proces opakovat. Vzhledem k tomu, že se při výpočtu neustále opakuje tentýž postup, je možné provádět jej rekurzivně. Počet rekurzivních opakování je dán minimální kolmou vzdáleností. Pokud je vzdálenost všech lomových bodů od úsečky menší než definovaná minimální kolmá vzdálenost proces se zastaví a generalizovaná linie již nebude dále dělena. Stejně tak je proces zastaven v případě, že se v okolí úsečky již žádný další bod nenachází. Při zadání nulové minimální kolmá vzdálenosti by se výsledek generalizace ztotožňoval s původní linií. Celý postup generalizace zachycuje obr 16.



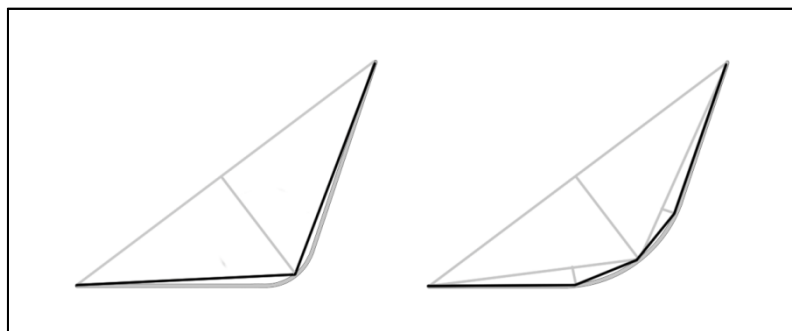
Obr. 16 Princip Douglas - Peuckerova algoritmu
(zdroj : http://en.wikipedia.org/wiki/File:Douglas_Peucker.png)

Douglas – Peuckerův algoritmus byl původně navržen pro generalizaci vektorových linií, z čehož je patrné, že pro zpracování příčných profilů pořízených dekompozicí rastru musel být nejprve částečně modifikován. Na jednotlivé pixely bylo třeba nahlížet jako na samostatné body v rovině, jejichž poloha je dána pořadím pixelu v profilu (vzdálenost od počátku profilu) a hodnotou pixelu, představující nadmořskou výšku. Představíme-li si pixely jako body, další průběh se od výše popsaného zpracování příliš lišit nebude. Pouze, bude-li přidáván nový lomový bod do generalizované linie (nejvzdálenější bod od úsečky), musí být současně zaznamenána poloha tohoto bodu. Po skončení generalizačního procesu získáváme záznam o všech bodech, v nichž nová linie mění směr. Tyto body představují terénní hrany, které byly na dané míře podrobnosti generalizace vyhodnoceny jako významné. Díky pořízeným záznamům, jsme schopni zpětně stanovit, jakým pixelům v původním profilu body odpovídají a tyto pixely v nezměněné podobě přenést na stejnou pozici v novém profilu. Neznámé hodnoty pixelů, které se v novém profilu nacházejí mezi těmito přenesenými pixely, jsou dopočítány lineární interpolací nadmořské výšky. Tímto krokem získáváme kompletní nový profil aproximující skutečný průběh terénu s ohledem na požadovaný stupeň zjednodušení.

V kapitole 5.3.1 bylo uvedeno, že jedním z důležitých parametrů, na jehož základě lze rozhodnout o významu terénní hrany, je převýšení tvaru, který hranu tvoří, nad okolním terénem. Zároveň bylo konstatováno, že zásadním problémem je přesné vymezení tohoto okolí a situace byla zjednodušena na převýšení terénní hrany od dvou nejbližších hran. Globální přístup ke generalizaci přináší na tuto problematiku zcela nový pohled. Není zde totiž porovnáváno převýšení ve smyslu nadmořské výšky, ale spíše ve smyslu vychýlení jednotlivých bodů od aproximovaného průběhu terénu, který je získáván v jednotlivých fázích generalizace a představován onou sestrojovanou úsečkou. Analýza vychýlení prostřednictvím kolmé vzdálenosti bodů ke generalizovanému terénu v sobě elegantně kombinuje analýzu všech tří základních parametrů hran (úhel svahů, které hranu tvoří; převýšení nad okolním terénem; délka svahů). Na druhou stranu, je uživateli ponechána pouze jediná proměnná, jejíž hodnotou může stupeň vyhlazení profilu ovlivnit a tou je již zmiňovaná minimální kolmá vzdálenost. Může být tématem diskuze, zda se nejedná o omezení, které zásadně znemožňuje přesnou detekci pouze určité skupiny hran, vymezené právě na základě tří základních parametrů. Je však třeba si uvědomit, že i s pomocí základních parametrů by byla takováto detekce značně složitá a pro

každý parametr by bylo nezbytné stanovit dvě prahové hodnoty vymežující interval, do nějž musí hodnoty parametrů skutečné hrany spadat. Navíc by bylo nutné nehodnotit hranu jako takovou, ale oba její svahy samostatně. Jedním z možných řešení by bylo oba přístupy kombinovat. Nejprve by bylo provedeno velmi podrobné vyhlazení terénu pomocí výše uvedeného algoritmu, eliminující jen ty nejméně významné hrany, a poté aplikována detekce založená na vyhodnocování parametrů, pomocí níž by byly vyhledány pouze hrany odpovídající specifickým požadavkům uživatele. Zde se však nabízí zejména otázka, do jaké míry a pro jaké účely by měla taková detekce smysl. Cílem této práce přitom není hledat na tuto otázku odpověď, ale představit nový způsob detekce terénních hran, k čemuž volí jednu z možných cest a tou je cesta jediného volitelného parametru, kterým je minimální kolmá vzdálenost. Do jaké míry byla tato cesta správná lze hodnotit na základě výsledků testování, prezentovaných prostřednictvím grafických příloh.

I v případě tohoto algoritmu se jako problematické jeví ty části terénu, v nichž dochází k pozvolné změně křivosti (plynulé přechody mezi dvěma různě skloněnými svahy). Pokud se křivost mění „dostatečně“ rychle a v terénu lze s ohledem na požadovanou míru podrobnosti stále hovořit o hraně, algoritmus tuto hranu detekuje správně (Obr. 17 vlevo). Bohužel zde platí, že algoritmus detekuje hranu i tehdy, mění-li se křivost pozvolna a povrch nabývá zaoblených tvarů. V takových případech je existence hrany přinejmenším sporná. Dosud jediný úspěšný způsob, kterým se dá, do jisté míry, této situaci předejít, je provést podrobnější detekci, než skutečně vyžadujeme a následně vybrat pouze hrany, jejichž svahy svírají úhel ostřejší než povolená mez. Ve skutečnosti se jedná o částečnou realizaci výše navrhované kombinace obou představených algoritmů. V příčném profilu, který zachycuje zaoblený terén je pak detekováno větší množství hran, jejichž úhel je však extrémně tupý a hrany pak budou z výsledku vyloučeny (obr. 17 vpravo).



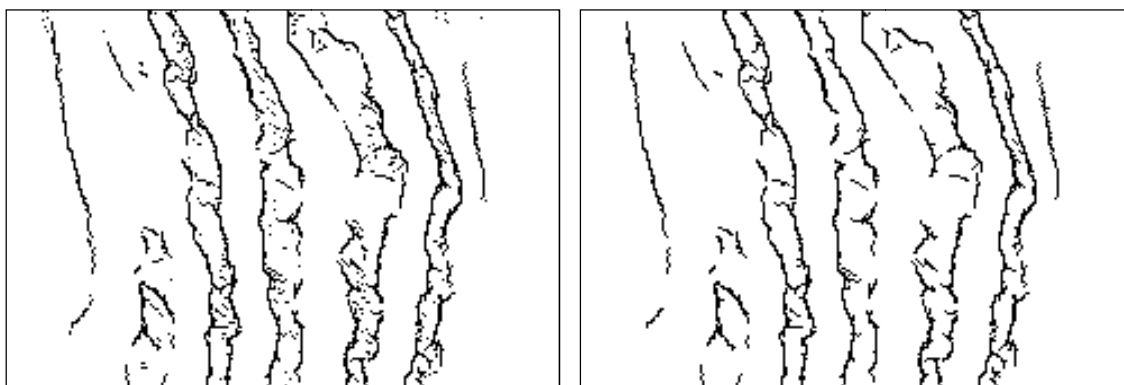
Obr. 17 Detekce hran na zaoblených terénních tvarech

Obdobně jako v předchozím algoritmu jsou postupným zpracováním původního rastru obdrženy čtyři dílčí binární rastry, z nichž je potřeba vhodnou kombinací vytvořit rastr výsledný. Protože se aplikuje zcela stejný postup, jako v předchozím případě, není zde tento proces již podrobněji rozebírán.

5.4.3 Eliminace krátkých hran

Analýzou příčného profilu jsme schopni zjistit, které pixely představují místa, jimiž v reálném terénu procházejí terénní hrany. Každá hrana je v jednotlivých profilech znázorněna právě jedním pixelem a kompletní informaci o tom, jakého tvaru celá hrana skutečně nabývá, obdržíme až z výsledného rastru. Teprve zde se také projeví další z vlastností hran, kterou je jejich délka (resp. délka průmětu hrany do horizontální roviny). Podobně jako nemají značný význam hrany, které jsou např. projevem šumu, nebudou zásadně důležité ani ty, jejichž délka je pro daný účel zanedbatelná. Výskyt krátkých hran může být důsledkem rozměrově nevýrazných terénních tvarů (např. haldy či balvany). V rastrové reprezentaci je délka hran vyjádřena počtem pixelů, který hranu tvoří (opět míněna délka průmětu nikoli skutečné hrany v prostoru).

Jednou z funkcí navrženého algoritmu je také eliminace těchto bezvýznamných hran. Ta vyhodnocuje počty pixelů, z nichž jsou jednotlivé hrany složeny, a pokud je počet nižší než předem zvolená mez, je příslušná hrana z výsledného binárního rastru odstraněna. Proces pracuje opět rekurzivně a vyhodnocuje nejbližší okolí pixelu tvořené osmi sousedními pixely. Pokud aspoň jeden pixel z okolí také představuje hranu (ve výsledném binárním rastru mu přísluší hodnota jedna), přesouvá se kontrola na okolí tohoto pixelu (příp. těchto pixelů) a celkový počet pixelů tvořících hranu je zvýšen o jedna. Pokud se v okolí řešeného pixelu již žádné další pixely představující hranu nevyskytují, je počet pixelů tvořících hranu zvýšen o jedna a opakování procesu zastaveno. Protože některé hrany mohou být poměrně dlouhé a výpočet by byl značně náročný na výpočetní čas i výkon počítače, je výsledný rastr rozdělen na podoblasti a zpracováván postupně. Jednotlivé podoblasti se přitom vzájemně překrývají a to minimálně v takovém rozsahu, který odpovídá nejmenší akceptované délce hrany. Díky tomu nemůže dojít k případu, že by byla některá hrana zachycena částí v jedné podoblasti a částí v jiné, a tyto části byly následně odstraněny, neboť by nesplňovaly minimální požadovanou délku. Ukázku původního výsledného rastru a rastru získaného eliminací poskytuje Obr. 18.



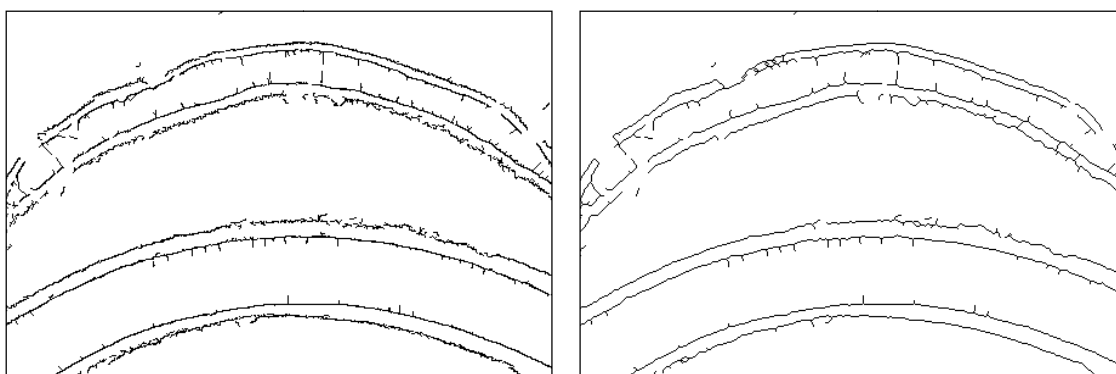
Obr. 18 Eliminace krátkých hran. Vlevo původní rastr, vpravo upravený

K redukci výsledného počtu hran je třeba přistupovat obezřetně. Pokud je terén značně proměnlivý, mohou být některé významné hrany zachyceny přerušovaně a z výsledku následně

odstraněny. Z výpočetního hlediska by bylo jejich odstranění korektní, pro interpretaci výsledků člověkem jsou však takto upravené výsledky poměrně nevhodné.

5.4.4 Ztenčování hran

Vlivem zpracování rastru ve více směrech může docházet k tomu, že se tatáž hrana v různých směrech neprojeví ve stejném pixelu. Ve výsledku se tento defekt projevuje zdvojením linií či roztřípením jejich průběhu. Pro odstranění tohoto nedostatku lze navrhnout aplikaci některých morfologických operací. Pro úpravu výsledků v této práci byla aplikována morfologická dilatace následovaná opakovaným morfologickým ztenčováním. Dilatace byla popsána již v kapitole 2.3.2.1. Morfologické ztenčování pracuje na obdobném principu jako dilatace, jsou však využívány složitější strukturní elementy, jež vedou ke skeletonizaci objektů zachycených v obraze. Jak uvádí Fisher et al. (c2004), morfologického ztenčování je pro úpravy výsledků detekcí hran využíváno velmi často a dále podrobně popisuje základní principy, na kterých je ztenčování založeno.



Obr. 19 Aplikace morfologických operací. Vlevo původní rastr, vpravo upravený

5.5 Implementace a testování algoritmu

Nejdůležitějším výsledkem celé této práce je návrh nového postupu pro detekci linií terénní kostry podrobně popsany v předchozí kapitole. Aby bylo možné tento postup hodnotit a srovnávat dosažené výsledky s jinými přístupy, bylo nezbytné jej realizovat. Tato kapitola představuje, jakým způsobem byl navržený algoritmus implementován, a jakých výsledků bylo dosaženo při jeho testování na dostupných datech představujících reálný terén.

5.5.1 Zpracování algoritmu v prostředí softwaru Matlab

K realizaci algoritmu byl zvolen software Matlab, který je široce využíván snad ve všech vědecko – výzkumných oborech, kde je kladen důraz na výpočetně zaměřené operace. Pro tuto práci byl zvolen zejména proto, že podporuje snadné vytváření vlastních funkcí a skriptů, což se

pro potřeby nového algoritmu jevílo jako zcela zásadní. Toto kritérium samozřejmě splňuje i celá řada programovacích jazyků, Matlab ale navíc nabízí přímou podporu zpracování obrazových dat, široké spektrum integrovaných funkcí, které bylo možné při práci využít, uživatelsky přívětivé grafické prostředí a vestavěné nástroje pro vizualizaci dosažených výsledků.

Implementace algoritmu byla rozdělena do čtyř částí, které představují tři naprogramované funkce a jeden spouštěcí skript. Celý zdrojový kód byl náležitě okomentován a je součástí příloh uložených na přiloženém CD. Následující text pouze v krátkosti přibližuje funkcionalitu kódu, uvádí vstupní proměnné, které je nutné jednotlivým funkcím předat, a prezentuje výstupy, které jsou algoritmem poskytovány. Vzhledem k tomu, že cílem bylo vytvořit pouze testovací implementaci umožňující demonstrovat funkcionalitu algoritmu, nebylo zcela dbáno na optimalizaci kódu a ošetření všech nestandardních situací, které mohou během výkonu kódu nastat.

Dílní části programu jsou:

- **StartSkript.m** – soubor obsahuje kód, který zajišťuje spouštění algoritmu a volání ostatních funkcí v požadovaném pořadí. V úvodní části uživatel inicializuje vstupní proměnné, jakými jsou požadovaná míra podrobnosti detekce a prostorové rozlišení rastru. Kromě toho je třeba definovat cestu ke vstupnímu rastru (doporučen formát TIFF) a stanovit maximální povolený úhel mezi dvěma svahy téže hrany, při kterém je průsečnice těchto svahů stále považována za hranu. Dále skript zajišťuje postupné zpracování rastru ve čtyřech základních směrech a jeho dekompozici na série příčných profilů. Tyto profily dále předává k detekci hran a obdržené nové profily s vyznačenými pixely hran skládá do výsledných rastrů pro jednotlivé směry. Čtyři získané rastry jsou, v souladu se zásadami popsány v předchozí kapitole, složeny do výsledného rastru, na který jsou aplikovány funkce zajišťující eliminaci krátkých hran a ztenčení výsledných linií. Pro proces ztenčení nebyla vytvořena vlastní funkce, ale je zahrnut přímo v kódu spouštěcího skriptu. V poslední části skriptu jsou definovány způsoby vizualizace výsledných dat. Ve verzi přiložené na CD algoritmus poskytuje grafické výstupy znázorňující výsledný rastr s detekovanými hranami, dále tento rastr po aplikaci procesů eliminace a ztenčení, a ještě blokdiagram území s vyznačeným průběhem nalezených hran.
- **Generalizace.m** – je jádrem celého algoritmu a obsahuje výpočetní aparát využívaný pro vyhlazení průběhu příčného profilu. Funkci jsou předávány dva vstupní parametry, kterými jsou vektor hodnot reprezentující nadmořské výšky v příčném profilu a minimální kolmá vzdálenost vyjadřující požadovanou míru podrobnosti. Funkce tedy pracuje vždy pouze s jediným profilem. Zdrojový kód je dále strukturován do dvou vnitřních funkcí. Účelem první je evidovat pixely označené během detekce za terénní hrany a po dokončení detekce na základě těchto pixelů pomocí lineární interpolace sestavit nový vyhlazený profil. Druhá vnitřní funkce zajišťuje samotnou rekursivní analýzu původního profilu, tzn. sestavení úseček mezi krajními body, nalezení nejvzdálenějších bodů od těchto úseček a navrácení údajů o pixelech (poloha a hodnota pixelu), které těmto bodům odpovídají. Spouštěcímu

skriptu, který tuto funkci volá je navrácen vektor hodnot, představující nadmořské výšky ve vyhlazeném profilu.

- **Detekce.m** – účelem funkce je vyhledat hrany ve vyhlazeném profilu. Je jí předáván vyhlazený profil (vektor hodnot), prostorové rozlišení rastru a maximální povolený úhel mezi svahy. Detekce hran spočívá ve výpočtu sklonů jednotlivých sousedících svahů. Vzhledem k tomu, že byl vyhlazený profil získán lineární interpolací, jsou jednotlivé svahy v profilu představovány úsečkami. Z toho vyplývá, že všechny pixely, které tvoří jeden svah, budou mít stejný sklon. Pro porovnání sklonů dvou sousedních svahů tak stačí porovnat sklony v bodech na okrajích těchto svahů. Pokud je rozdíl sklonů menší než rozdíl úhlu 180° a maximálního povoleného úhlu, není hrana nadále považována za významnou. Výstupem funkce je vektor hodnot, kde hodnota jedna označuje pozici pixelu, jímž prochází hrana. Ostatní hodnoty jsou rovny nule.
- **Eliminace.m** – v rastru zachycujícím průběh hran vyhledá hrany, jejichž délka je menší než stanovená mez a tyto hrany z rastru odstraní. Délka hrany je zde chápána ve smyslu počtu pixelů, které hranu tvoří. Funkci je potřeba předat matici představující rastr s hranami, požadovaný minimální počet pixelů pro zachování hrany a velikost oblasti umožňující rychlejší zpracování matice po částech (viz kap. 5.4.3). Výstupem funkce je upravený rastr.

5.5.2 Testování algoritmu

Testování algoritmu proběhlo na datech pořízených ve čtyřech lokalitách, jež byly popsány v kap. 5.1. Algoritmus byl aplikován s různými hodnotami vstupních parametrů a bylo zjišťováno, jak se tato rozličná nastavení projeví na obdržených výsledcích. Hodnot, kterých mohou jednotlivé parametry nabývat je nepřeberně mnoho. K demonstraci základní funkcionality algoritmu naštěstí postačí i relativně malé množství příkladů. Z dosažených výsledků byl pro každou lokalitu vybrán jeden grafický výstup, který dle subjektivního hodnocení autora nejlépe zachycoval dominantní terénní hrany v daném území. Všechny výsledky jsou prezentovány ve formě grafických příloh umístěných za textem této práce. U každého výstupu je uveden název lokality, k níž se vztahuje, a výchozí hodnoty vstupních parametrů, se kterými byl algoritmus v jednotlivých případech spouštěn. Konkrétní hodnoty jsou uzavřeny do hranatých závorek, a při čtení zleva doprava odpovídají minimální kolmé vzdálenosti, maximálnímu úhlu a nejmenší povolené délce hrany. Další výstupy, které byly do příloh zařazeny, ukazují vliv hodnot jednotlivých parametrů na výslednou detekci a dokumentují, jakým způsobem se projevují funkce eliminace krátkých hran a ztenčení. Interpretace výsledků a jejich zhodnocení je předmětem následující kapitoly.

6 DISKUZE

Primárním cílem této práce bylo navrhnout novou metodu detekce linií terénní kostry. Jako zdroj informací o nadmořské výšce terénu měla být použita data, pořízená technologií leteckého laserového skenování, převedená do rastrové podoby. Laserová data mají několik specifických vlastností, mezi něž patří zejména jejich vysoká přesnost a hustota zaměřených bodů. Díky tomu poskytují velice detailní popis terénu, v němž jsou zachyceny i velmi malé terénní tvary, na kterých dochází ke vzniku drobných terénních hran. Zatímco v některých případech může být vyhledání takovýchto hran v datech žádoucí, jindy se tyto hrany jeví jako bezvýznamné a při detekci by měly být zanedbány. Při rozhodování o tom, zda hrana je či není významná, lze postupovat různě, vždy by však mělo být zajištěno, aby míru podrobnosti, s jakou bude detekce prováděna, mohl stanovit uživatel. Na to byl kladen zvláštní důraz při návrhu vlastního algoritmu pro detekci hran, představeného v této práci.

Touto prioritou se prezentované řešení výrazně odlišuje od přístupů publikovaných v odborné literatuře. Bez ohledu na to, zda uveřejněné postupy zpracovávají data v podobě původního bodového mračka nebo v podobě rastru, je jejich prvotním cílem odhalit existenci hran v datech a co nejpřesněji určit jejich průběh. Otázce morfologické významnosti jednotlivých hran je pozornost věnována pouze okrajově. Gomes Pereira a Wicherson (1999) umožňují vyhledávat pouze hrany vznikající na svazích, jejichž sklon je vyšší než předem definovaná prahová hodnota, Briese et al. (2009) nabízejí jako volitelný parametr ovlivňující proces detekce hodnotu maximální křivosti povrchu. V této práci však bylo předvedeno, že detekce postavená na analýze jediného parametru popisujícího hranu má jen omezené možnosti a lze ji aplikovat pouze na některých typech terénu. Dobrých výsledků bude pravděpodobně dosaženo v oblastech s pravidelným terénem, kde hrany představují ostré přechody mezi svahy s velmi hladkým průběhem. V takových oblastech autoři velmi často své algoritmy také testovali a přiloženými výsledky dokládají vysokou úspěšnost. Bohužel však chybí ukázky aplikací v různých typech terénu, které by prokazovaly univerzálnost jednotlivých řešení.

Vlastní metoda je odlišná i ve způsobu zpracování rastrových dat, kterým se odklání od hojně využívaného principu konvoluce a představuje analýzu příčných profilů. Příčný profil představuje řez terénem v určitém směru, přičemž pro rastr lze tyto řezy výhodně ztotožnit

s jednotlivými řádky, sloupci nebo diagonálami v obou úhlopříčných směrech. Pokud jsou každým pixelem v rastru vedeny profily ve všech čtyřech základních směrech (podél řádku, sloupce a obou diagonál), získáváme relativně komplexní představu o skutečném tvaru terénu v místě daného pixelu a jsme schopni určit, zda tento pixel představuje hranu či nikoliv. Dříve než jsou jednotlivé profily analyzovány je jejich průběh vyhlazen a jsou zachovány pouze ty hrany, které jsou pro aktuální zadání považovány za významné. Při vyhlazování je uplatněn princip Douglas – Peuckerova algoritmu, využívaného v kartografii při generalizaci lomených čar. Díky tomu, je na profily nahlíženo globálně a důležitost hran je posuzována podle toho, jak významně se hrany projevují v rámci celého profilu. Toto je výrazný rozdíl od postupů založených na konvoluci, při kterých jsou jednotlivé pixely vyhodnocovány pouze ve vztahu k jejich nejbližšímu okolí, jež je pevně definováno velikostí konvoluční masky.

Algoritmus byl testován na datech, pocházejících ze čtyř lokalit na území Česka. Jednotlivé lokality reprezentují morfologicky rozličná území, což umožnilo sledovat chování algoritmu s daty odpovídajícími různým typům terénu. Během testování bylo vygenerováno nepřeberné množství výsledků pro nejrůznější nastavení vstupních parametrů. Z nich byly vybrány pouze ty, které dle autora nejlépe demonstrují funkcionalitu předloženého řešení. Kromě toho byl k práci přiložen také zdrojový kód algoritmu napsaný v prostředí softwaru Matlab.

Na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že hlavní cíl práce, tedy navržení vlastní metody schopné detekovat terénní hrany v rastrových datech, pořízených z dat leteckého laserového skenování, byl splněn. Ve všech testovacích lokalitách se podařilo odhalit terénní hrany, odpovídající zadaným vstupním parametrům. Je třeba poznamenat, že hodnocení výsledků bylo postaveno na porovnání získaných výstupů s 3D modely terénu, ve kterých je možné terénní hrany snadno identifikovat. Tento způsob je doporučován např. v práci (Gomes Pereira; Janssen, 1999). Vhodnější by jistě bylo porovnat dosažené výsledky s daty, zachycujícími průběh terénních hran, pořízenými pomocí jiných metod detekce. Taková data bohužel nebyla pro testovací lokality k dispozici a nepodařilo se získat ani žádný software, který by vytvoření takových dat umožňoval (detekce terénních hran je v softwarech zaměřených na analýzu digitálních modelů terénu zatím opomíjena). Exaktní hodnocení úspěšnosti algoritmu je dluhem, který je v budoucnu rozhodně třeba odčinit.

Obecně lze konstatovat, že průběh reálného terénu je značně složitý. Hrany, které se v něm objevují, mohou vznikat na nejrůznějších terénních tvarech, jejichž konkrétní podoba je silně proměnlivá. Přihlédneme-li k těmto skutečnostem, pak není možné očekávat, že by výsledkem detekce terénních hran byla síť jednoduchých linií, jednoznačně vyjadřujících průběh hran ve sledované oblasti. Čím více se obdržené výsledky takovému stavu blíží, tím je lze obecně považovat za kvalitnější. Vždy je však třeba upřednostnit korektní detekci terénních hran před snahou dosáhnout esteticky hodnotných výstupů.

Za velmi dobré lze považovat výsledky získané z lokalit Ohrobec (příloha 2) a Kladruby (příloha 5). Z dosažených výstupů je patrné, že více než výšková členitost terénu je pro detekci hran zásadní jeho kompaktnost. Svahy tvořící většinu údolí v lokalitě Ohrobec jsou jasně ohraničeny horní i dolní hranou a jejich průběh je relativně pravidelný. Jako kompaktní část

povrchu s velmi podobnými vlastnostmi v jeho různých částech, lze označit také rozlehlou plošinu v SZ části území. Analogické plošně významné části povrchu s homogenním průběhem se nacházejí také v lokalitě Kladruby, kde je území tvořeno převážně rovinatým povrchem, který je narušen v místech dopravní komunikace, potoka a odškracených meandrů a mrtvých ramen řeky Labe. Většina hran, vznikající na těchto tvarech, byla při detekci odhalena, stejně jako údolnice, horní hrany údolí, břehová čára Vltavy a hrany lomových stěn v lokalitě Ohrobec. Pokud je terén složen z menšího množství plošně rozlehlých homogenních částí, lze i pro nalezení nejvýznamnějších terénních hran využít podrobnější generalizaci. Pro Ohrobec byla nastavena hodnota minimální kolmé vzdálenosti 2 m, díky níž mají linie poměrně souvislý charakter (nejsou příliš přerušované). V lokalitě Kladruby bylo samozřejmě třeba použít hodnotu nižší (0,5 m), neboť zde terénní tvary dosahují výrazně menších rozměrů. Jakým způsobem se v praxi projeví nastavení různých hodnot minimální kolmé vzdálenosti je zachyceno také v přílohách 6 a 7. Prostřední obrázky znázorňují nastavení vyšší míry podrobnosti prováděné detekce (nižší hodnoty minimální kolmé vzdálenosti), díky čemuž je zachyceno větší množství terénních hran. Spodní obrázky ukazují pro téže území výsledky méně podrobné detekce. Zatímco pro okolí kamenolomu (příloha 6), jsou dominantní hrany v terénu (lomové hrany, údolnice) zachyceny i při méně podrobné detekci, v případě výřezu z lokality Kladruby (příloha 7) dochází k výraznému poklesu počtu nalezených linií. V takovém výsledku již např. není možné vytyčit průběh silnice, která oblastí prochází.

Nejvyšší hodnota minimální kolmé vzdálenosti byla zvolena pro lokalitu Ralsko (příloha 3). Terén je v tomto území silně nepravidelný, tvořený množstvím plošně menších terénních tvarů. Při podrobnější detekci bylo odhaleno značné množství hran, které právě na drobných terénních tvarech vznikají. Tyto hrany samozřejmě také popisují reálnou podobu terénu (hrany, se v terénu skutečně nacházejí), pro vystižení hlavních morfologických rysů terénu však nejsou příliš významné a proto byly během detekce cíleně potlačeny. Vlivem extrémně složitého průběhu terénu se také řada výsledných linií projevuje poměrně roztříštěně. V tomto případě vzniká nebezpečí, že by mohly být z výsledku zcela odstraněny při procesu eliminace krátkých hran. Během tohoto procesu jsou z výsledného rastru odstraněny veškeré linie, které jsou kratší než předem stanovená mez. Za délku hrany je pro tyto potřeby považován počet pixelů, které hranu tvoří. Pokud je hrana příliš krátká (hranici stanoví uživatel), lze předpokládat, že na celkový tvar terénu bude její vliv pouze minimální a není tedy třeba jí do výsledků zahrnovat. Jak eliminace krátkých hran ovlivňuje dosažený výsledek, je zachyceno na prostředním obrázku v příloze 9. K volbě minimální akceptovatelné délky hrany je třeba přistupovat uvážlivě, neboť může dojít i k eliminaci relativně důležitých hran, které se vlivem nastavení minimální kolmé vzdálenosti jeví jako přerušované. Obě hodnoty je proto potřeba volit ve vzájemném souladu a s ohledem na cíl prováděné detekce.

Čtvrtou testovací lokalitou byla lokalita Seč (příloha 4). Jednu z nejvýraznějších hran zde představuje břehová linie vodní nádrže, která je velmi dobře identifikovatelná také ve výsledném rastru. Kromě toho, byl zachycen průběh údolnice, kopírující řeku Chrudimku v prostoru pod hrází, a hranami byl ohraničen také levý svah údolí, kterým řeka protéká. Dále se

ve výsledku objevily hrany popisující těleso hráze či potok přitékající do nádrže z obce Seč. Okolí přehrady je tvořeno relativně členitým terénem, jehož průběh je však plynulý a nevytváří ostré přechody. Linie terénní kostry je ale možné vymezit i na oblých tvarech (hřbetnici lze přesně určit i na oblém hřbetu), což dokládá, že průběh linie terénní kostry nemusí být vždy nezbytně doprovázen průběhem terénní hrany. V takových situacích se projevuje jedna ze slabin vlastního řešení, které tyto linie terénní kostry vyhledává jen velmi složitě. Při analýze příčných profilů dochází k tomu, že na oblých tvarech je linie terénní kostry (např. hřbetnice) v každém profilu detekována na různých místech. Průběh linie tak není zaznamenán jedinou linií, ale pruhem samostatných pixelů, který naznačuje přibližný směr hledané linie. Celá situace se navíc komplikuje i tím, že se obdobně projevují také místa, ve kterých terén plynule přechází mezi dvěma svahy. V takových místech by naopak nalezení linií terénní kostry bylo nežádoucí, neboť se zde žádné takové linie ve skutečnosti nenacházejí. Jistým řešením by bylo využití principů odtokových analýz, které jsou schopny takovéto terénní hrany, často odpovídající rozvodnicím, odhalit. Přestože je celá situace popisována na příkladu hřbetnic, analogická situace nastává také u některých případů údolnic. Jak bylo již uvedeno, pruhy samostatných pixelů vznikají i v místech nepravých hran, kde terén plynule mění svoji křivost. Tento nedostatek algoritmus zmírňuje zavedením dalšího vstupního parametru, kterým je maximální povolený úhel mezi svahy. Díky tomu jsou ve výsledném rastru ponechány pouze ty hrany, jejichž svahy svírají menší úhel než je předem stanovená mez. Projev různé hodnoty tohoto parametru je zachycen v příloze 8. Na prostředním obrázku jsou patrné shluky pixelů představujících výskyt zaoblených hran. Při zadání ostřejšího úhlu se tyto pixely ve výsledku dále neobjevují.

Problém detekování jediného bodu hrany v různých pixelech, jež je projevem zpracování profilů vedených ve čtyřech směrech, se do jisté míry objevuje také u ostrých hran. V důsledku toho se mohou linie jevit jako roztřepené či se v některých místech zdvojit. Řešení tohoto nedostatku lze hledat ve využití morfologických operací používaných při úpravách binárního obrazu. V této práci je aplikována operace dilatace, následovaná opakovaným ztenčováním do doby, než má výsledná linie šířku pouze jednoho pixelu. Pokud se ve výsledném obrazu objevují osamocené linie, poskytuje aplikace morfologických operací velmi dobré výsledky (příloha 9, spodní obrázek). Nachází-li se více linií, představujících hrany blízko sebe, dochází ke slévání linií a jejich propojování do buněk, což působí velice nepřírozeně. V souvislosti s morfologickými operacemi je třeba zmínit, že pracují pouze s binárním obrazem a nikoli s informacemi o průběhu terénu. Výsledkem jsou potom vizuálně kvalitnější výstupy, jejichž vytvoření však může být na úkor přesnosti lokalizace terénní hrany.

Otázku přesnosti je třeba zmínit také v souvislosti se zpracováním rastrových dat. Každý převod bodového mračka na rastr je poznamenán určitou ztrátou přesnosti. Pokud navíc připočteme ztrátu přesnosti způsobenou aplikací morfologických operací, může již docházet k významnému poklesu kvality obdrženého výsledku. Naprosto optimálním řešením, které lze pro řešení tohoto problému navrhnout, je kombinace zde představeného algoritmu s algoritmy popisovanými v publikacích (Kraus; Pfeifer, 1998) či (Briese, 2004). Výstup z navrženého algoritmu by poskytoval vstupní odhady terénních hran pro algoritmus pracující nad daty v

podobě původního bodového mračna. Tím by byla zajištěna funkcionalita zohledňující významnost hran i vysoká přesnost konečného výsledku.

7 ZÁVĚR

V leteckém laserovém skenování se skrývá velice silný nástroj pro pořizování výškopisných dat o zemském povrchu. Data získaná touto technologií již našla své praktické uplatnění v mnoha různých oborech a lze očekávat, že další odvětví lidské činnosti potenciál laserových dat teprve objeví. V odborné společnosti je problematika pořizování dat a jejich zpracování stále předmětem intenzivního výzkumu. Přispět k poznání v oblasti detekce linií terénní kostry v laserových datech převedených do podoby rastru bylo hlavním cílem této práce.

V textu je popsána vlastní metoda vyhledávání terénních hran, která staví na zcela jiných základech než doposud publikované postupy. Opouští tradiční zpracování rastru za pomoci konvoluční masky a místo toho nabízí kombinaci analýzy příčných profilů a Douglas – Peuckerova algoritmu. Díky tomu je možné hrany nejen vyhledat, ale také následně rozhodnout o tom, jak významně se podílejí na charakteristickém tvaru terénu v zájmovém území.

Obecně lze konstatovat, že testování experimentálního algoritmu vytvořeného na základě navrhované metody splnilo prvotní očekávání. Terénní hrany byly v souladu se zadanými vstupními parametry odhaleny ve všech testovacích územích zachycujících rozličné typy terénu. Ukázalo se také, že díky možnosti zadávat různé vstupní parametry, lze algoritmu přizpůsobit jednak konkrétnímu tvaru terénu, v němž mají být hrany vyhledány, ale také požadavkům uživatele na podrobnost detekce.

Zároveň je však třeba kriticky poukázat na některé nedostatky, mezi něž patří zejména nedostatečné ošetření detekce linií terénní kostry v terénu s oblými tvary a degradace přesnosti laserových dat, která je dána rastrovou podobou vstupních dat a do jisté míry také detekcí prováděnou skrze příčné profily. Jako řešení tohoto nedostatku lze navrhnout kombinaci vlastního postupu s některými algoritmy pracujícími přímo nad bodovým mračnem, což by mohlo přinést velmi dobré výsledky. Tímto směrem by se měl ubírat také budoucí výzkum navazující na tuto práci.

SEZNAM ZDROJŮ INFORMACÍ

- AXELSSON, P. 1999. Processing of laser scanner data – algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* [online]. Volume 54, Issue 2/3, p. 138 – 147. [cit. 2011-07-17]. Dostupné z URL: <<http://warnercnr.colostate.edu/~lefsky/isprs/1133.pdf>>. ISSN 0924-2716.
- AXELSSON, P. 2000. Dem generation from laser scanner data using adaptive tin models. In: *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. Amsterdam : ISPRS, 2000 [cit. 2011-07-21]. Volume 33, Part B4, p. 110 – 117. Dostupné z URL: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXIII/congress/part4/111_XXXIII-part4.pdf>. ISSN 1682-1750.
- BADEA, D.; JACOBSEN, K. 2008. Filtering process of lidar data. In: *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. Beijing : 2008 [cit. 2011-07-17]. Volume 37, Part B1, p. 815 – 819. Dostupné z URL: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/141.pdf>. ISSN 1682-1750.
- BALTSAVIAS, E. P. 1999a. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* [online]. Volume 54, Issue 2/3, p. 83 – 94. [cit. 2011-07-17]. Dostupné z URL: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.42.6581&rep=rep1&type=pdf>>. ISSN 0924-2716.
- BALTSAVIAS, E. P. 1999b. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* [online]. Volume 54, Issue 2/3, p. 199 – 214. [cit. 2011-07-17]. Dostupné z URL: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.42.1900&rep=rep1&type=pdf>>. ISSN 0924-2716.

- BRÁZDIL, K. 2010. Projekt tvorby nového výškopisu území České republiky. In: HRUBÁ, L.; PODHORANYI, M.; KAPIAS, A. (eds.) *Sborník - Sympozium GIS Ostrava 2010* [online]. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010 [cit. 2011-08-09]. Dostupné z URL: < http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2010/sbornik/Lists/Papers/CZ_5_2.pdf >. ISBN 978-80-248-2171-9.
- BRETAR, F. ... [et al.]. 2004. Terrain modeling and airborne laser data classification using multiple pass filtering. In: *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. Istanbul : ISPRS, 2004 [cit. 2011-07-29]. Volume 35, Part B3, p. 314 – 319. Dostupné z URL: <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm3/papers/287.pdf> >. ISSN 1682-1750.
- BRIESE, CH. 2004. *Breakline modelling from airborne laser scanner data* [online]. Wien, 2004. 67 s. Dissertation. Fakultät für Mathematik und Geoinformation, Technische Universität Wien. Dostupné z URL: <http://www.ipf.tuwien.ac.at/phdtheses/diss_cb_04.pdf>.
- BRIESE, CH. ... [et al.]. 2009. Automatic Break Line Determination for the Generation of a DTM Along the River Main. In: BRETAR, F.; PIERROT – DESEILLIGNY, M.; VOSSELMAN, G. (Eds.) *Laser scanning 2009* [online]. Paris : IAPRS, 2009 [cit. 2011-08-04]. Volume 38, Part 3/W8, p. 236 – 241. Dostupné z URL: <http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_177260.pdf>.
- BRÜGELMANN, R. 2000. Automatic breakline detection from airborne laser range data. In: *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. Amsterdam : ISPRS, 2000 [cit. 2011-07-21]. Volume 33, Part B3, p. 109 – 116. Dostupné z URL: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXIII/congress/part3/109_XXXIII-part3.pdf>. ISSN 1682-1750.
- BRZANK, A.; LOHMANN, P.; HEIPKE, C. 2005. Automated extraction of pair wise structure lines using airborne laserscanner data in coastal areas. In: VOSSELMAN, G.; BRENNER, C. (eds.) *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. Enschede : ISPRS, 2005 [cit. 2011-07-19]. Volume 36, Part 3/W19, p. 36 – 41. Dostupné z URL: <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W19/papers/036.pdf>>. ISSN 1682-1777
- CENIA. c2010-2011. *Geoporál* [online]. CENIA, c2010-2011. [cit. 2011-08-06]. Dostupné z URL: <<http://geoportal.gov.cz/web/guest/map?openNode=MapList>>.
- ČÁBELKA, M. 2008. *Úvod do GPS*. 2008. (studijní text)
- DEMEK, J. 1987. *Obecná geomorfologie*. 1. vyd. Praha : Academia, 1987. 476 s.
- DOLANSKÝ, T. 2004. *Lidary a letecké laserové skenování* [online]. Ústí nad Labem : Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2004. [cit. 2011-07-17]. 100 s. Dostupné z URL: < <http://wvc.pf.jcu.cz/ki/data/files/160lidaryweb.pdf> >. ISBN 80-7044-575-0.

- ECKSTEIN, W.; MUNKEL, O. 1995. Extracting objects from digital terrain models. In: SCHENK, T. (ed.) *Remote Sensing and Reconstruction for Three-Dimensional Objects and Scenes* [online]. [s.l.] : SPIE, 1995. Volume 2572, p. 43-51. Dostupné z URL: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.27.765&rep=rep1&type=pdf>>.
- ESRI. c2011. *ArcGIS Desktop 9.3 Help Server 9.3 Help* [online]. ESRI, c2011 [cit. 2011-08-19]. Dostupné z URL: <<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3>>.
- FISHER, R. ... [et al.]. c2004. *Image processing learning resources* [online]. c2004 [cit. 2011-08-16]. Dostupné z URL: <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/hipr_top.htm>.
- FÖRSTNER, W. 1998. Image preprocessing for feature extraction in digital intensity, color and range images. *Springer Lecture Notes on Earth Sciences* [online]. Dostupné z URL: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.7.949&rep=rep1&type=pdf>>.
- GOMES PEREIRA, L. M.; JANSSEN, L.L.F. 1999. Suitability of laser data for DTM generation : A case study in the context of road planning and design. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* [online]. Volume 54, Issue 2/3, p. 244 – 253. [cit. 2011-07-17]. Dostupné z URL: <<http://directory.umm.ac.id/Data%20Elmu/jurnal/P/Photogrammetry%20%26%20Remotesensing/Vol54.Issue4.Sept1999/1143.pdf>>. ISSN 0924-2716.
- GOMES PEREIRA, L. M.; WICHERSON, R. J. 1999. Suitability of laser data for deriving geographical information : A case study in the context of management of fluvial zones. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* [online]. Volume 54, Issue 2/3, p. 105 – 114. [cit. 2011-07-17]. Dostupné z URL: <<http://warnercnr.colostate.edu/~lefsky/isprs/1132.pdf>>. ISSN 0924-2716.
- HECHT, J. [200-?]. *Laser* [online]. Encyclopaedia Britannica, [200-?] [cit. 2011-07-16]. Dostupné z URL: <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/330874/laser>>.
- HUG, CH.; WEHR, A. 1997. Detecting and identifying topographic objects in imaging laser altimeter data. In: *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. Stuttgart : ISPRS, 1997 [cit. 2011-07-21]. Volume 32, Part 3 – 4 W2, p. 19 – 26. Dostupné z URL: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/wg34/wg34_hug.pdf>.
- JEŽEK, J. 2008. *Geostatistika : Úvod do geostatistiky*. 2008. (studijní text)
- KALVODA, P. ... [et al.]. 2004. Kalibrace GPS/IMU snímačů ve fotogrammetrii. In: *Sborník abstraktů konference JUNIORSTAV 2004* [online]. 1. vyd. Brno : Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2004, s. 50 – 56. Dostupné z URL: <http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2004texty/pdf/06_Geodezie%20a%20kartografie/6_02_Teoreticke%20aspekty%20geodezie%20a%20kartografie/Kalvoda_Petr.pdf>. ISBN 80-214-2560-1.
- KILIAN, J. ... [et al.]. 1996. Capture and evaluation of airborne laser scanner data. *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. Vienna : ISPRS, 2007 [cit. 2011-07-17]. Volume 31, Part B3, p. 383 – 388. Dostupné z URL: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXI/congress/part3/383_XXXI-part3.pdf>. ISSN 0256-1840.

- KRAUS, K. 2002. *Principles of airborne laser scanning* [online]. Austria : Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Technical University of Vienna, 2002. Dostupné z URL: <http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/kk_schweden_laserscanning.pdf>.
- KRAUS, K.; PFEIFER, N. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* [online]. Volume 53, Issue 2/3, p. 193 – 203. [cit. 2011-07-17]. Dostupné z URL: <<http://www.martinkodde.nl/glacier/data/bibliography/2526743040kraus.pdf>>. ISSN 0924-2716.
- KRAUS, K.; PFEIFER, N. 2001. Advanced DTM generation from lidar data. In: HOFTON, M. A. (ed.) *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*. [online]. Annapolis : ISPRS, 2001 [cit. 2011-07-19]. Volume 34, Part 3/W4, p. 23 – 30. Dostupné z URL: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.150.7055&rep=rep1&type=pdf>>.
- KŘÍKAVOVÁ, L. 2009. *Interpolace bodových dat v GIS* [online]. Praha, 2009. 55 s. Bakalářská práce. Fakulta stavební, České vysoké učení technické. Vedoucí práce Ing. Jiří Cajthaml, Ph.D. Dostupné z URL: <<http://gama.fsv.cvut.cz/~cepek/proj/bp/2009/linda-krikavova-bp-2009.pdf>>.
- LEMMENS, M. 2007. Airborne Lidar Sensors. *GIM International* [online]. Volume 21, Issue 2, p. 24 - 27. [cit. 2011-07-17]. Dostupné z URL: <http://www.gim-international.com/files/productsurvey_v_pdfdocument_11.pdf>. ISSN 1566-9076.
- MEISELS, A.; RAIZMAN, S.; KARNIELI, A. 1995. Skeletonizing a DEM into a drainage network. *Computers & Geosciences* [online]. Volume 21, Issue 1, p. 187 – 196. [cit. 2011-08-11]. Dostupné z URL: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.55.3840&rep=rep1&type=pdf>>. ISSN 0098-3004.
- MORIN, K. W. 2002. *Calibration of Airborne Laser Scanners* [online]. Calgary, 2002. 125 s. Diploma thesis. University of Calgary. [cit. 2011-07-17]. Dostupné z URL: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.73.5013&rep=rep1&type=pdf>>.
- O'CALLAGHAN, F. J.; MARK, M. D. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision Graphics and Image Processing* [online]. Volume 28, Issue 3, p. 323 – 344. [cit. 2011-08-04]. Dostupné z URL: <http://champs.cecs.ucf.edu/Library/Conference_Papers/pdfs/The%20extraction%20of%20drainage%20networks%20from%20digital%20elevation%20data.pdf>. ISSN 0734189X.
- ORŠULÁK, T.; PACINA, J. 2010. *3D modelování a virtuální realita* [online]. 1. vyd. Ústí nad Labem : Centrum pro virtuální realitu a modelování krajiny, 2010 [cit. 2011-07-17]. 63 s. Dostupné z URL: <<http://gis.fzp.ujep.cz/DTM/3d.pdf>>.

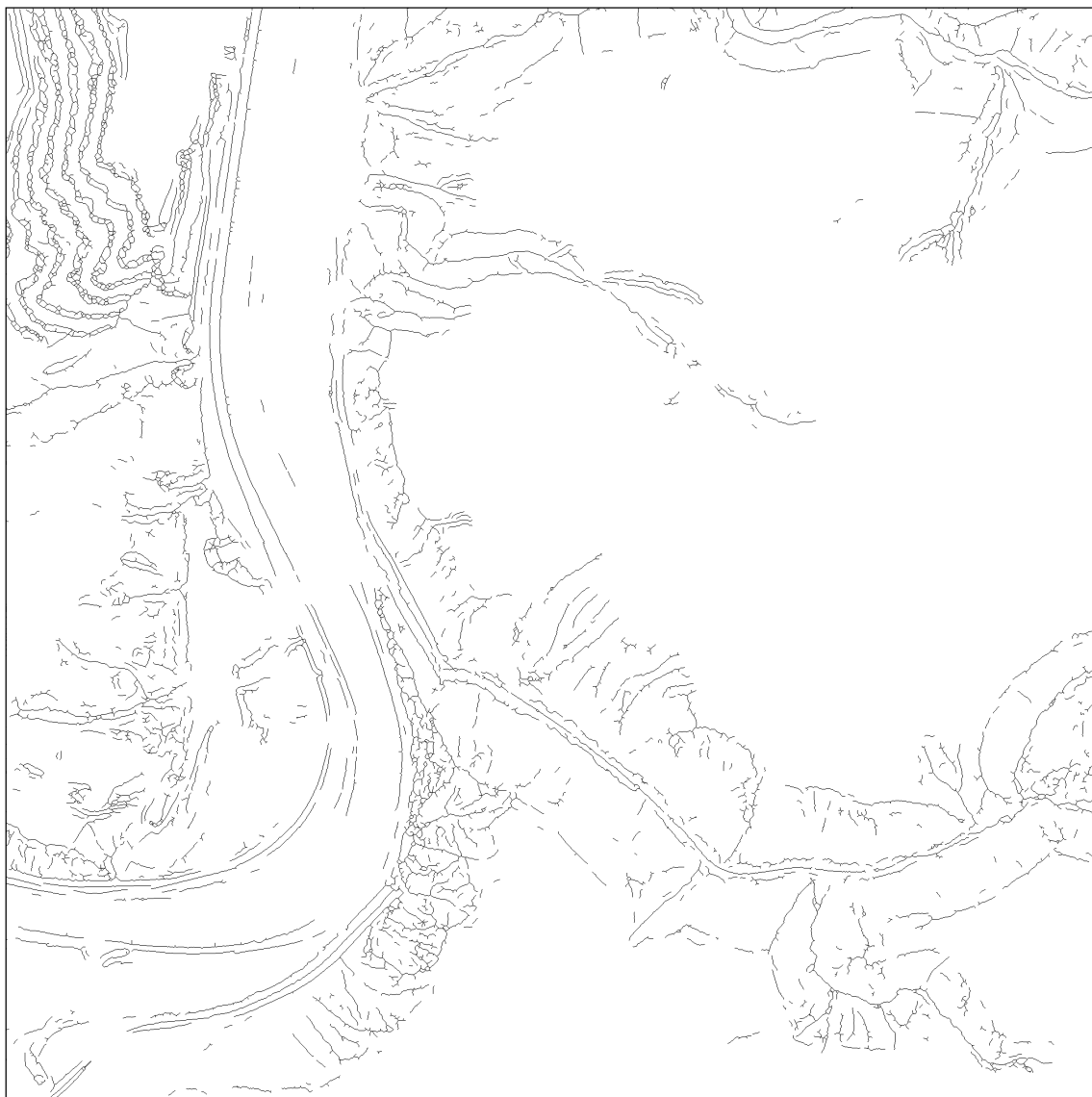
- PFEIFER, N.; BRIESE, CH. 2007. Geometrical aspects of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning. In: *Proceedings of the ISPRS Workshop - Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007* [online]. Espoo : ISPRS, 2007 [cit. 2011-07-17]. Volume 36, Part 3, p. 311 – 319. Dostupné z URL: < http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W52/final_papers/Pfeifer_2007_keynote.pdf>. ISSN 1682-1777.
- ROGGERO, M. 2001. Airborne laser scanning clustering in raw data. In: HOFTON, M. A. (ed.) *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*. [online]. Annapolis : ISPRS, 2001 [cit. 2011-07-19]. Volume 34, Part 3/W4, p. 227 – 232. Dostupné z URL: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.151.574&rep=rep1&type=pdf>>.
- SCHICKLER, W.; THORPE, A. 2001. Surface estimation based on lidar. In: ASPRS Annual Conference, Gateway to the New Millennium. [online]. St. Louis : ASPRS, 2001. Dostupné z URL: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.125.7475&rep=rep1&type=pdf>>.
- SIBLÍK, J. 2007. *Konverze rastru na vektor* [online]. Brno, 2007. 29 s. Bakalářská práce na Fakultě informačních technologií Vysokého učení technického v Brně. Vedoucí práce Ing. Jana Šilhavá. Dostupné z URL: < <http://www.fit.vutbr.cz/study/DP/rpfile.php?id=5707>>.
- SITHOLE, G. 2001 Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter. In: HOFTON, M. A. (ed.) *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*. [online]. Annapolis : ISPRS, 2001 [cit. 2011-07-19]. Volume 34, Part 3/W4, p. 203 – 210. Dostupné z URL: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.151.62&rep=rep1&type=pdf>>.
- SITHOLE, G.; VOSSELMAN, G. 2004. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* [online]. Volume 59, Issue 1/2, p. 85 – 101. [cit. 2011-07-17]. Dostupné z URL: <<http://www.mendeley.com/research/experimental-comparison-of-filter-algorithms-for-bareearth-extraction-from-airborne-laser-scanning-point-clouds/>>. ISSN 0924-2716.
- ŠÍMA, J. 2011. Nové zdroje geoprostorových dat pokrývajících celé území státu od roku 2010 – první výsledky výzkumu jejich kvalitativních parametrů. In: RŮŽIČKA, J.; PEŠKOVÁ, K. (eds.) *Sborník - Symposium GIS Ostrava 2011* [online]. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2011. [cit. 2011-08-09]. Dostupné z URL: <http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2011/sbornik/papers/Sima.pdf>. ISBN 978-80-248-2366-9.
- TALHOFER, V. 2008. *Vojenská topografie*. Brno : Univerzita obrany, 2008. 176 s.
- VEVERKA, B.; ZIMOVÁ, R. 2008. *Topografická a tematická kartografie*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2008. 198 s.

- VOSSelman, G. 2000. Slope based filtering of laser altimetry data. In: *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. Amsterdam : ISPRS, 2000 [cit. 2011-08-02]. Volume 33, Part B3, p. 935 – 942. Dostupné z URL: <<http://administration.ewi.tudelft.nl/live/binaries/d75fdcff-35ba-4734-9de1-b66fc2022eb0/doc/vosselmanfiltering.pdf>>. ISSN 1682-1750.
- VÚGTK. c2005-2011. *Terminologický slovník zeměměřičství a katastru nemovitostí* [online]. VÚGTK c2005-2011. [cit. 2011-07-29]. Dostupné z URL: <<http://www.vugtk.cz/slovník>>.
- WAGNER, W. ... [et al.]. 2004. From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners : Potential and practical challenges. In: *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. Istanbul : ISPRS, 2004 [cit. 2011-07-29]. Volume 35, Part B3, p. 201 – 206. Dostupné z URL: <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm3/papers/267.pdf>>. ISSN 1682-1750.
- WEHR, A; LOHR, U. 1999. Airborne laser scanning – an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* [online]. Amsterdam : Elsevier Science, 1999 [cit. 2011-07-17]. Volume 54, Issue 2/3, p. 68 – 82. Dostupné z URL: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.9.516&rep=rep1&type=pdf>>. ISSN 0924-2716.
- WILD, D.; KRZYTEK, P.; MADANI, M. 1996. Automatic Breakline Detection Using an Edge Preserving Filter. In: *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*. [online]. Vienna : ISPRS, 2005 [cit. 2011-07-19]. Volume 31, Part B3, p. 946 – 952. Dostupné z URL: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXI/congress/part3/946_XXXI-part3.pdf>. ISSN 0256-1840.
- ZHANG, K. ... [et al.]. 2003. A Progressive Morphological Filter for Removing Nonground Measurements From Airborne LIDAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* [online]. Volume 41, Issue 4, p. 872 – 882. [cit. 2011-07-17]. Dostupné z URL: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.8.791&rep=rep1&type=pdf>>. ISSN 0196-2892.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	CD s elektronickou verzí práce
Příloha 2	Lokalita Ohrobec [2, 170, 15]
Příloha 3	Lokalita Ralsko [10, 175, 5]
Příloha 4	Lokalita Seč [5, 175, 10]
Příloha 5	Lokalita Kladruby [0,5, 178, 15]
Příloha 6	Vliv parametru <i>minimální kolmá vzdálenost</i> (Lokalita Ohrobec – kamenolom)
Příloha 7	Vliv parametru <i>minimální kolmá vzdálenost</i> (Lokalita Kladruby – výřez podél silnice)
Příloha 8	Vliv parametru <i>maximální úhel mezi svahy</i> (Lokalita Ralsko – výřez z jižního svahu)
Příloha 9	Eliminace krátkých hran a ztenčení (Lokalita Ohrobec – výřez podél potoka v JV části lokality)

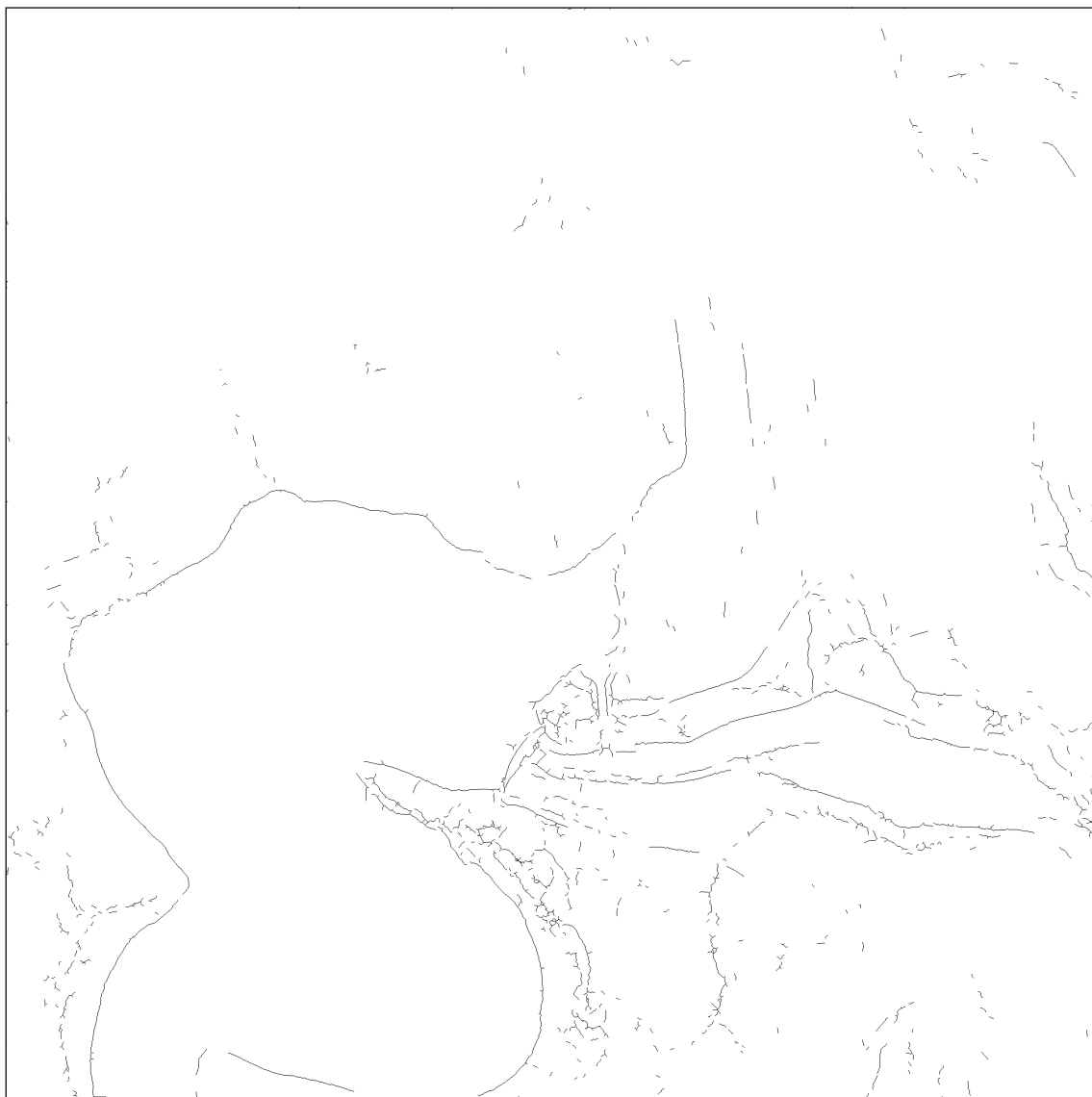
Příloha 2: Lokalita Ohrobec [2, 170, 15]



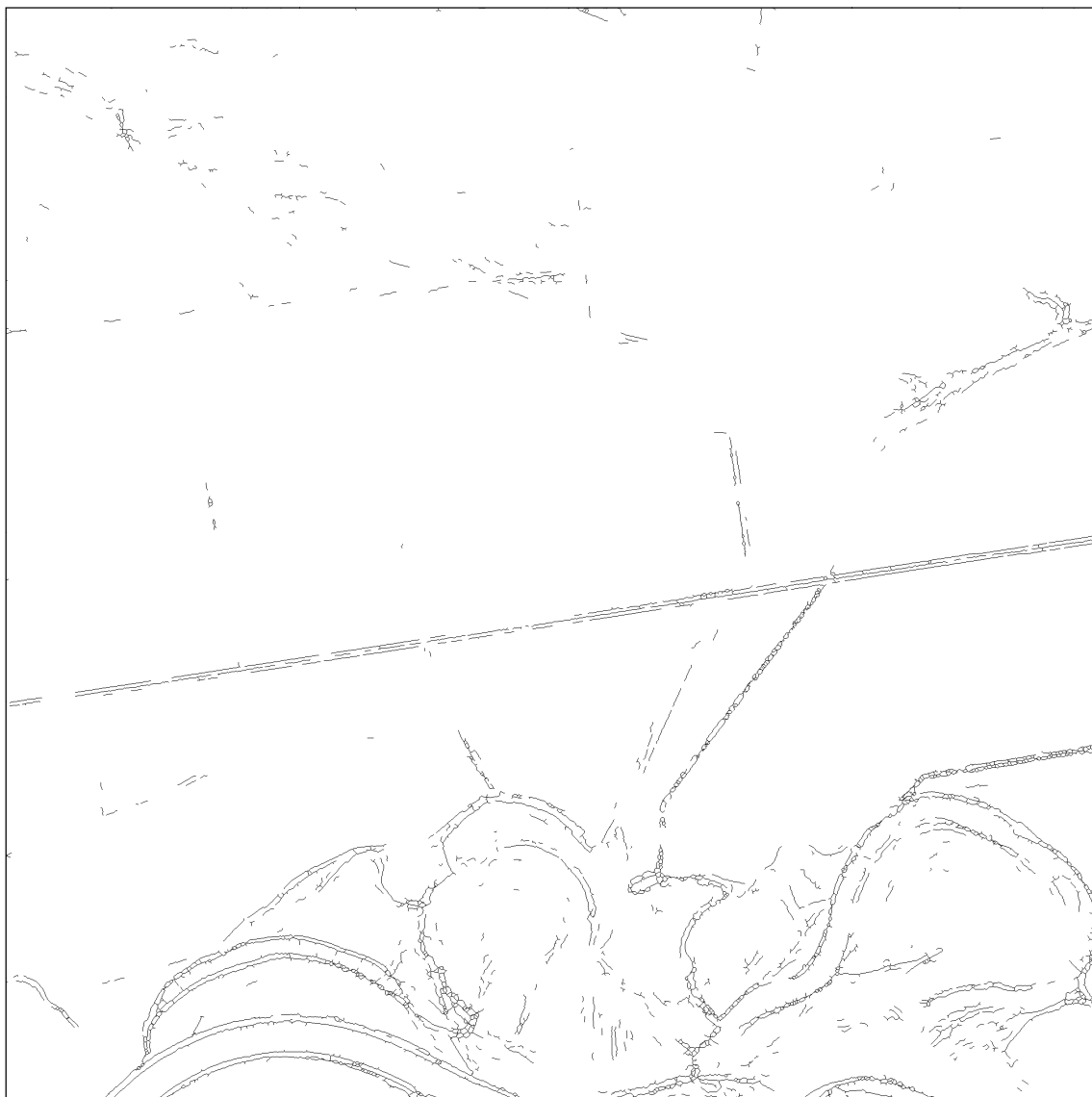
Příloha 3: Lokalita Ralsko [10, 175, 5]



Příloha 4: Lokalita Seč [5, 175, 10]



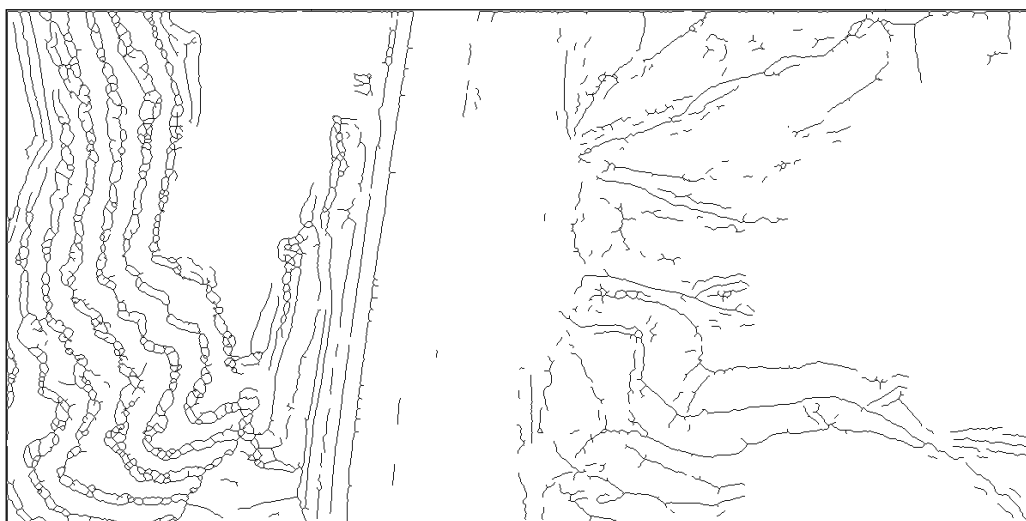
Příloha 5: Lokalita Kladruby [0,5, 178, 15]



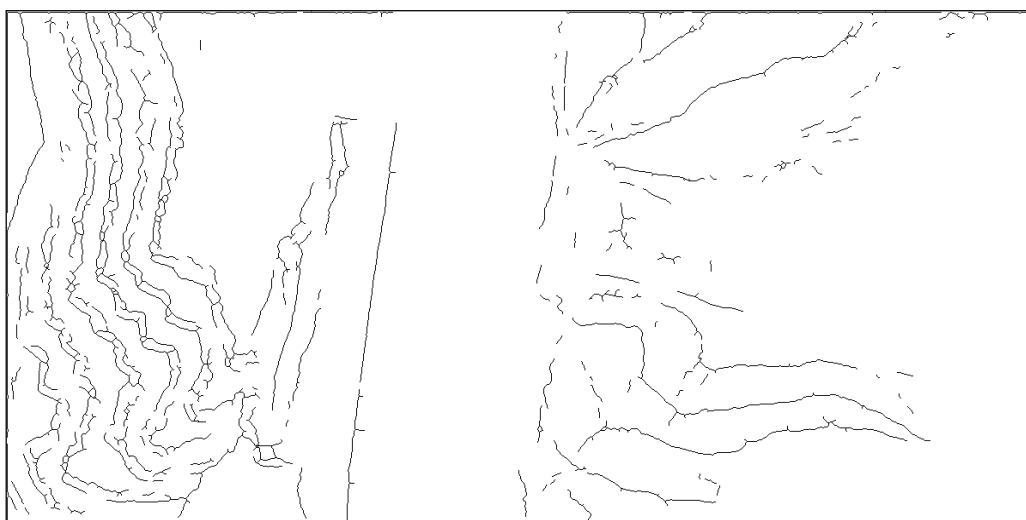
Příloha 6: Vliv parametru *minimální kolmá vzdálenost* (Lokalita Ohrobec – kamenolom)



Šedotónový rastr – bílá představuje nejvýše položené oblasti, černá nejnižše položené oblasti



Detekované hrany po eliminaci krátkých hran a ztenčení. Parametry detekce [2, 170, 10]

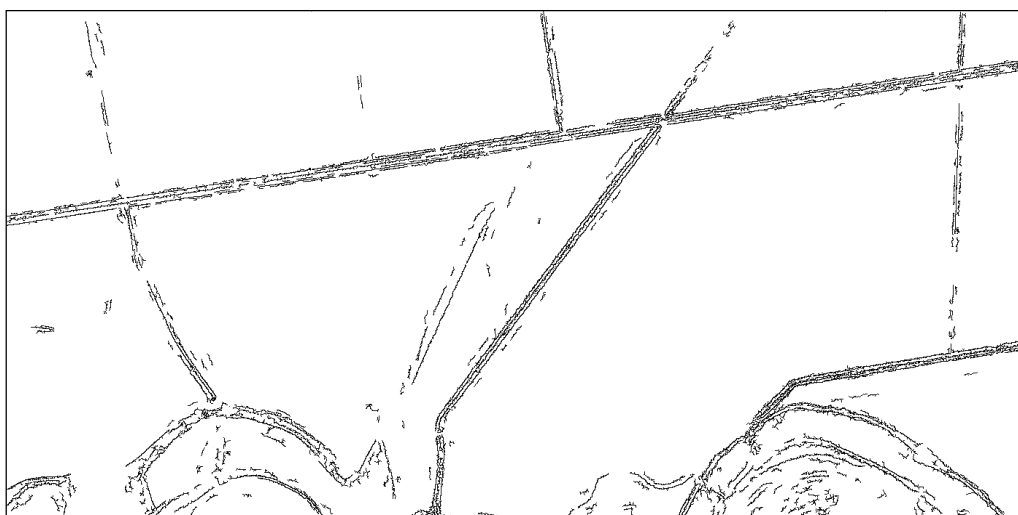


Detekované hrany po eliminaci krátkých hran a ztenčení. Parametry detekce [8, 170, 10]

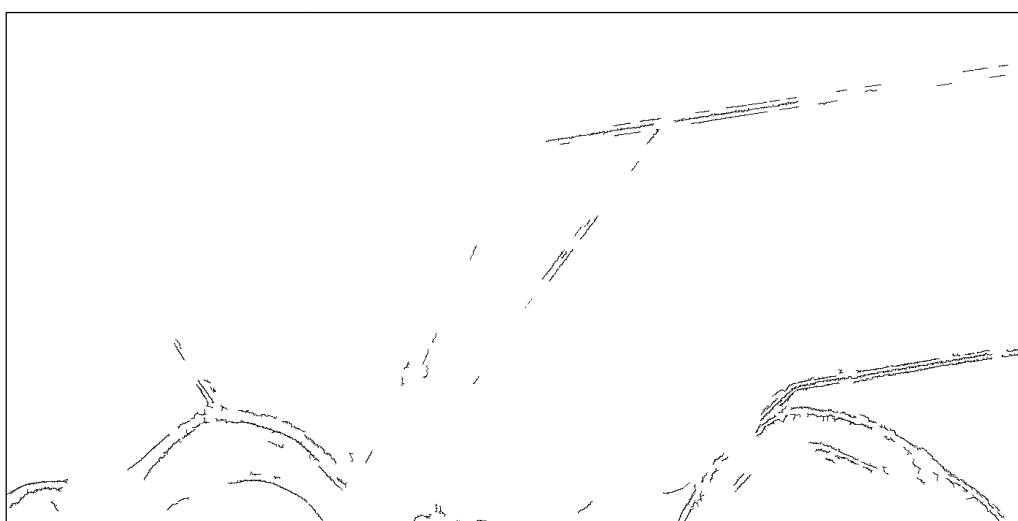
Příloha 7: Vliv parametru *minimální kolmá vzdálenost* (Lokalita Kladruby – výřez podél silnice)



Šedotónový rastr – bílá představuje nejvýše položené oblasti, černá nejnižše položené oblasti

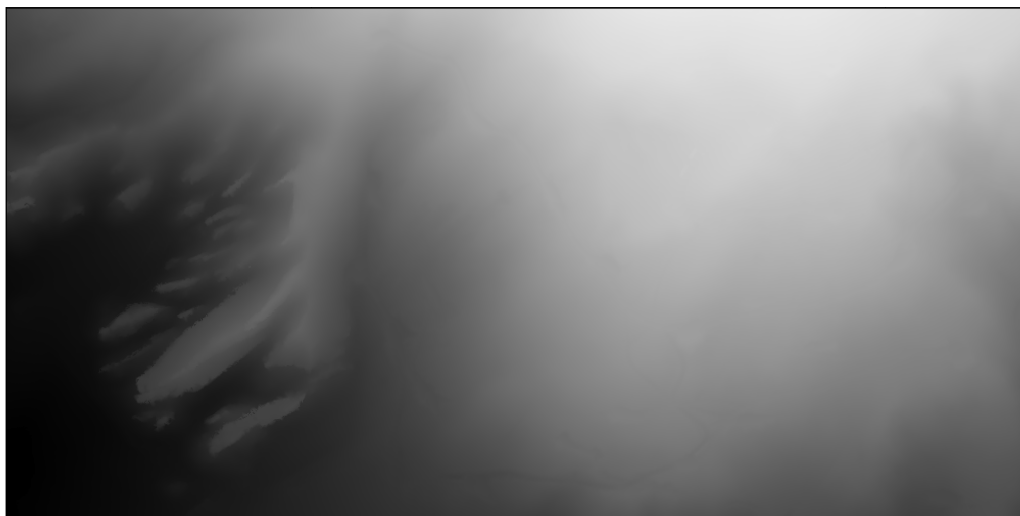


Detekované hrany po eliminaci krátkých hran. Ztenčení neaplikováno. Parametry [0,3, 178, 15]

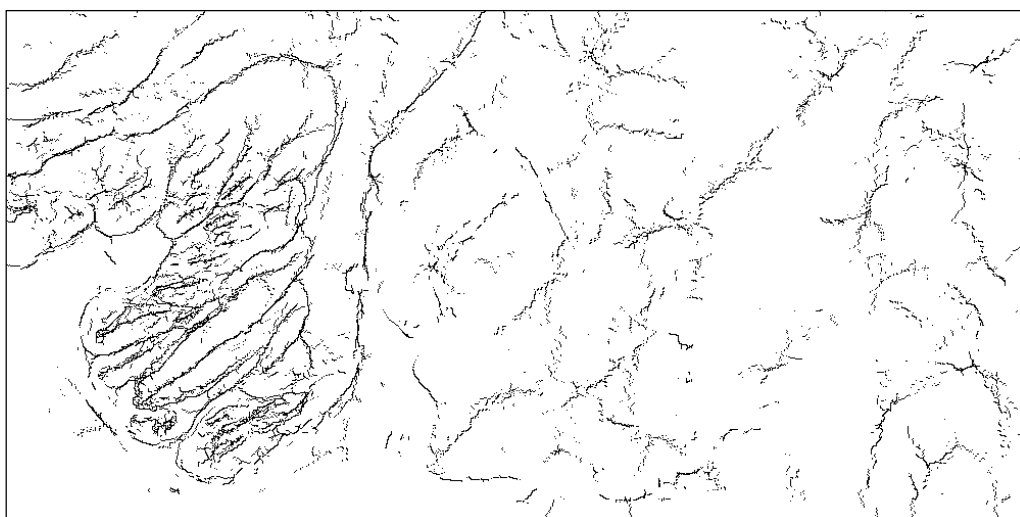


Detekované hrany po eliminaci krátkých hran. Ztenčení neaplikováno. Parametry [0,8, 178, 15]

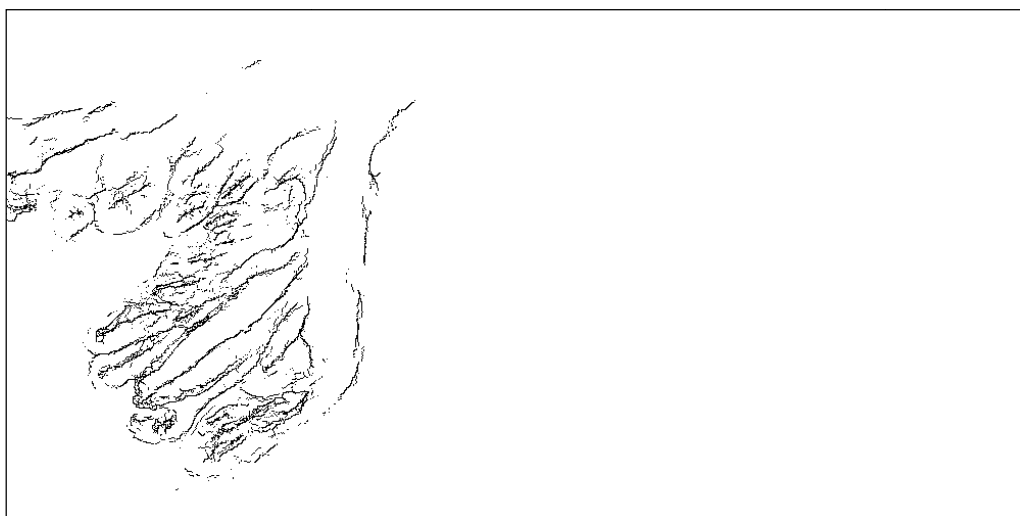
Příloha 8: Vliv parametru *maximální úhel mezi svahy* (Lokalita Ralsko – výřez z jižního svahu)



Šedotónový rastr – bílá představuje nejvýše položené oblasti, černá nejnižše položené oblasti



Detekované hrany. Eliminace krátkých hran ani ztenčení neaplikováno. Parametry [5, 175, 10]

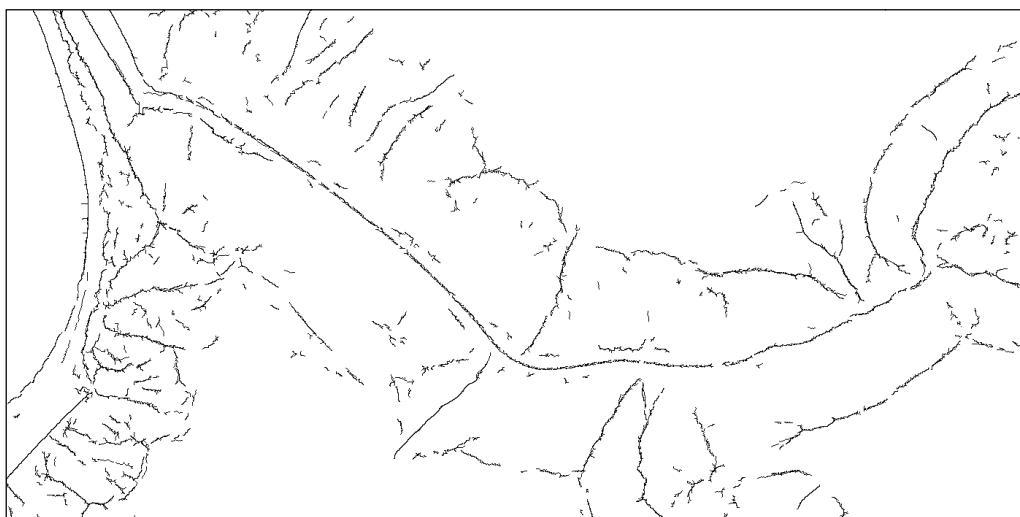


Detekované hrany. Eliminace krátkých hran ani ztenčení neaplikováno. Parametry [5, 150, 10]

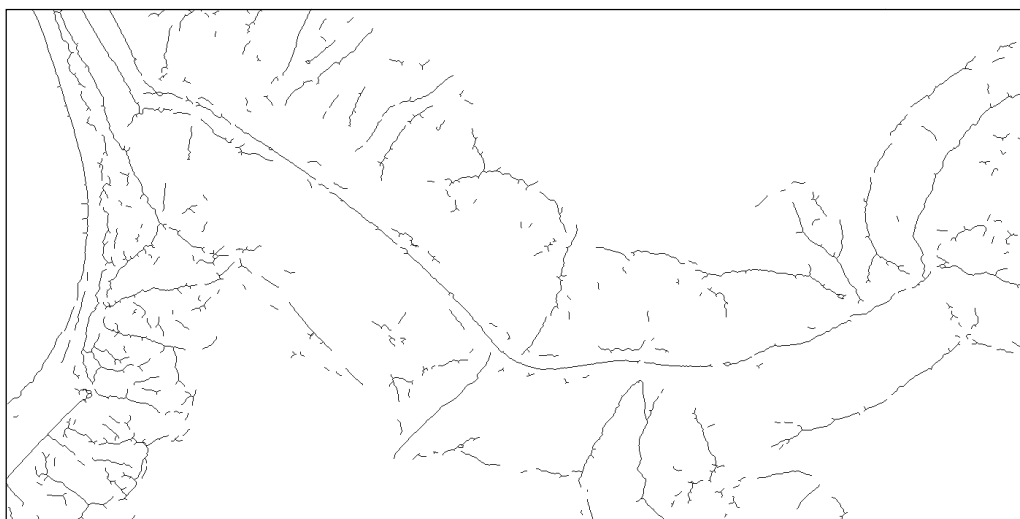
Příloha 9: Eliminace krátkých hran a ztenčení (Lokalita Ohrobec – výřez podél potoka v JV části lokality)



Detekované hrany bez aplikování eliminace krátkých hran a ztenčení. Parametry [5, 170, 10]



Detekované hrany. Aplikována eliminace krátkých hran. Parametry [5, 170, 10]



Detekované hrany. Výsledek po eliminování krátkých hran a ztenčení. Parametry [5, 170, 10]